

Bauaufsichtlich anerkannte Stelle
für Prüfung, Überwachung und
Zertifizierung
Zulassung neuer Baustoffe, Bauteile
und Bauarten
Forschung, Entwicklung, Demonstra-
tion und Beratung auf den Gebieten
der Bauphysik

Institutsleitung
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Gerd Hauser
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Klaus Sedlbauer

Integrale Akustiksysteme für thermisch aktive Betonbauteile

Kurzbericht

Der Bericht umfasst
7 Seiten Text
7 Abbildungen

Das Forschungsprojekt wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) und des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung (BBR) gefördert.

(Aktenzeichen: Z 6 – 10.08.18.7- 07.35/ II 2 – F20-07-41)

Die Verantwortung für den Inhalt des Berichts liegt beim Autor.

Stuttgart, 13. November 2009

Projektleiter



Horst Drotleff

Bearbeiter



Roman Wack

1 Ziel des Vorhabens

Immer häufiger werden in Büro- und Verwaltungsgebäuden bauteilaktivierte Geschossdecken eingesetzt. Mit dem Wegfall der Akustik-Unterdecke steht damit die wertvollste Fläche zur Raumbedämpfung nicht mehr zur Verfügung. Das Ziel des Vorhabens war die Entwicklung von Schall absorbierenden Systemen für bauteilaktivierte Betondecken, welche

- einen nutzungsabhängig passenden Schallabsorptionsgrad aufweisen bei gleichzeitig minimalen thermischen Verlusten;
- ein gleichmäßiges und ebenes Erscheinungsbild zeigen, um aktuelle architektonische Trends zu unterstützen;
- hohe Wirtschaftlichkeit mit einfachem Baustellenbetrieb sicher stellen.

Mit den Lösungen soll eine gleichmäßig verteilte Schallabsorption möglichst an der gesamten Deckenfläche erzielt werden. Damit lässt sich einerseits die Grundbedämpfung für kommunikationsintensive Räume sicherstellen. Andererseits ist dies die Voraussetzung für eine flexibel gestaltbare akustische Trennung von Arbeitsplätzen durch Schallschirme.

2 Durchführung

Als Lösungsansatz wurden abwechselnd angeordnete Streifen aus Schallabsorbieren und schallharter Betondecke gewählt. Der Wechsel der akustischen Impedanzen führt zu deutlich höheren Absorptionsgraden, als ein nicht periodischer Aufbau mit gleichem Absorber-Flächenanteil. Damit lässt sich der Anteil der Wärme dämmenden Absorber so gering halten, dass die Kühlfunktion nicht nennenswert beeinträchtigt wird. Vollständig in die Betondecke eingelassen ermöglichen die Streifen ein ebenes Erscheinungsbild

Für die akustische Optimierung der Streifengeometrie ist eine rechnerische Vorhersage unerlässlich. Daher wurde eine theoretische Modellierung der akustischen Eigenschaften erarbeitet. Mit Messungen des Schallabsorptionsgrads an kleinformatischen Proben im Kundt'schen Rohr wurde das Rechenmodell überprüft.

Rechnerische und messtechnische Parametervariationen führten zu einer Auswahl von Wirkprinzipien und Absorbermaterialien. Anschließend wurden größere Funktionsmuster bei diffusem Schalleinfall im Hallraum untersucht. Für die aussichtsreichsten Varianten wurde mittels FEM-Rechnungen die Verminderung der Wärmeübertragung quantifiziert.

3 Ergebnisse

3.1 Theoretische Modellierung

Zur Berechnung der Schallabsorptionsgrade wurde ein Rechenmodell erarbeitet und als Software implementiert. Das Modell basiert auf einem Streuwellenansatz von Lord Rayleigh [1]. Dabei wird von einer unendlich ausgedehnten Fläche mit der akustischen Admittanz A_1 ausgegangen, in der Absorberstreifen mit der Breite L_2 und der Admittanz A_2 eingelassen sind. Der Aufbau ist periodisch mit einer Periodenlänge Λ_x (vgl. Bild 1).

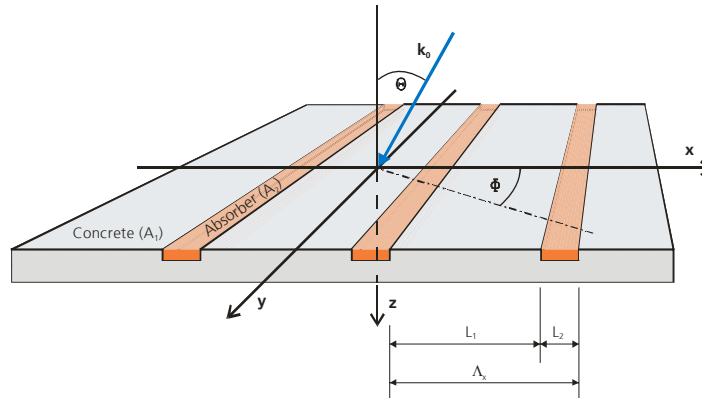


Bild 1: Betonbauteil, das mit wenigen Schall absorbierenden Streifen versehen ist.

Das an der Oberfläche gestreute Schallfeld wird durch eine Summe harmonischer Wellen zusammen gesetzt. Fällt eine Schallwelle mit einem Polwinkel θ und dem Azimutwinkel ϕ ein, so lässt sich das Schallfeld vor dem Bauteil beschreiben als:

$$p(x, y, z) = e^{j(\alpha_0 x + \beta_0 y - \gamma_0 z)} + \sum_{m=-\infty}^{\infty} R_m e^{j(\alpha_m x + \beta_m y + \gamma_m z)}. \quad (1)$$

Dabei bedeuten α_0 , β_0 , γ_0 die Projektionen der Wellenzahl k_0 auf die kartesischen Koordinaten x , y , z . R_m sind die unbekannt (komplexen) Amplituden der gestreuten Schallwellen und α_m , β_m , γ_m sind deren projizierte Wellenzahlen. Das Zeitglied ist $e^{j\omega t}$.

Die gestreute Wellenzahl entlang der Periode (also in x -Richtung) kann nach [2] wie folgt geschrieben werden: $\alpha_m = \alpha_0 + m \cdot 2\pi / \Lambda_x$. Die Wellenzahlen β_m ist gleich β_0 und die Wellenzahlen γ_m können aus der Helmholtzgleichung bestimmt werden: $\gamma_m = \pm \sqrt{k_0^2 - \alpha_m^2 - \beta_0^2}$. $\text{Re}(\gamma_m > 0)$ ergibt ausbreitende Schallwellen und $\text{Im}(\gamma_m < 0)$ ergibt abnehmende oder schwindende Schallwellen in den oberen Halbraum ($z < 0$) nach Bild 1.

Für die Amplituden der gestreuten Teilwellen lassen sich einem Gleichungssystem berechnen:

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty} R_m (\omega \rho_0 \cdot a_{n-m} + \delta_{m,n} \gamma_m) = \omega \rho_0 \cdot a_n + \delta_{0,n} \gamma_0. \quad (2)$$

Darin bedeuten:

$$\delta_{m,n} = \begin{cases} 1 & : n = m \\ 0 & : n \neq m \end{cases} \quad \text{and} \quad \delta_{0,n} = \begin{cases} 1 & : n = 0 \\ 0 & : n \neq 0 \end{cases}. \quad (3)$$

Der winkelabhängige Schallabsorptionsgrad des gestreiften Bauteils kann nun nach [3] berechnet werden:

$$\alpha_{\theta, \Phi} = 1 - \sum_{\text{Re}(\gamma_m > 0)} |R_m|^2 \frac{\gamma_m}{\gamma_0}, \quad (4)$$

Für die wärmetechnischen Berechnungen wurde auf ein übliches FEM-Programm zurück gegriffen.

3.2 Entwicklung von Schallabsorbern

3.2.1 Akustische Wirksamkeit

Als Ergebnis rechnerischer Parameterstudien wurden folgende Eigenschaften von Aufbauten mit periodischen Absorberstreifen deutlich:

- Die Anordnungen weisen einen deutlich höheren Schallabsorptionsgrad auf, als das Flächenmittel erwarten ließe.
- Je schlanker die Periode ist, desto breiter ist das Schallabsorptionsspektrum bei demselben Absorbereinsatz.
- Im Gegensatz zu nicht periodischen Absorbern nimmt der Absorptionsgrad mit größer werdendem Polwinkel θ zu. Dies ist günstig für die Büronutzung, denn somit unterbindet die Decke Reflexionen über große Distanzen. In Bild 3 ist der winkelabhängige Absorptionsgrad für eine beispielhafte Frequenz gezeigt, bei der sich Streuwellen ausbilden.

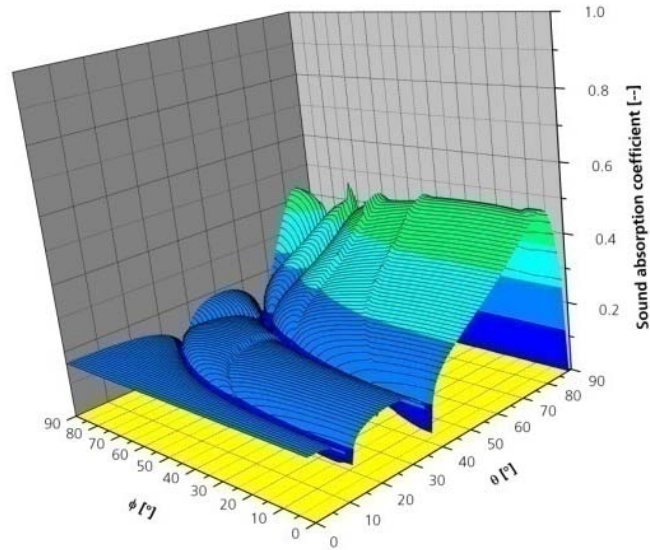


Bild 2: Berechneter winkelabhängiger Schallabsorptionsgrad nach Gleichungen (2).
 $L_1 = 0.8 \text{ m}$, $L_2 = 0.2 \text{ m}$, $\Lambda_x = 1.0 \text{ m}$,
 $A_1 = 0$, $A_2 = 1$
 $2\pi(\Lambda_x/\lambda_0) = 16$.

Drei akustische Wirkprinzipien wurden auf ihre Eignung zum Aufbau der Absorberstreifen hin untersucht: Poröse Absorber, mikroperforierte Absorber MPA und Schlitzabsorber [4]. Für einen Aufbau mit Glasschaum-Streifen ist in Bild 3 der Schallabsorptionsgrad bei senkrechtem Schalleinfall gezeigt. Die Übereinstimmung von Rechnung und Messung im Kundt'schen Rohr ist für Entwicklungszwecke ausreichend. Der Vergleich mit dem Absorptionsgrad eines nicht periodischen Aufbaus mit gleicher Absorberfläche macht die Vorteile der Streifenanordnungen deutlich.

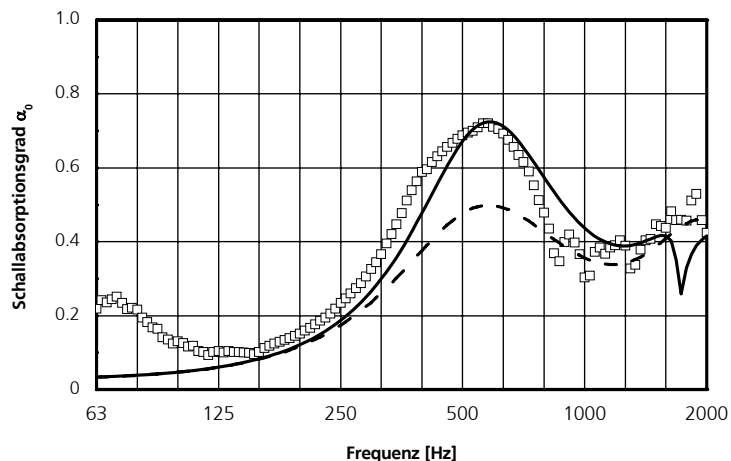


Bild 3: Gemessener (∇) und berechneter (—) Schallabsorptionsgrad bei senkrechtem Schalleinfall einer Probe aus Glasschaumstreifen und Holzbalken (beide 50 mm tief und breit). Zum Vergleich ist der flächengemittelte Absorptionsgrad (- -) eingetragen.

Bild 4 zeigt den Absorptionsgrad einer großformatigen Probe im Hallraum.

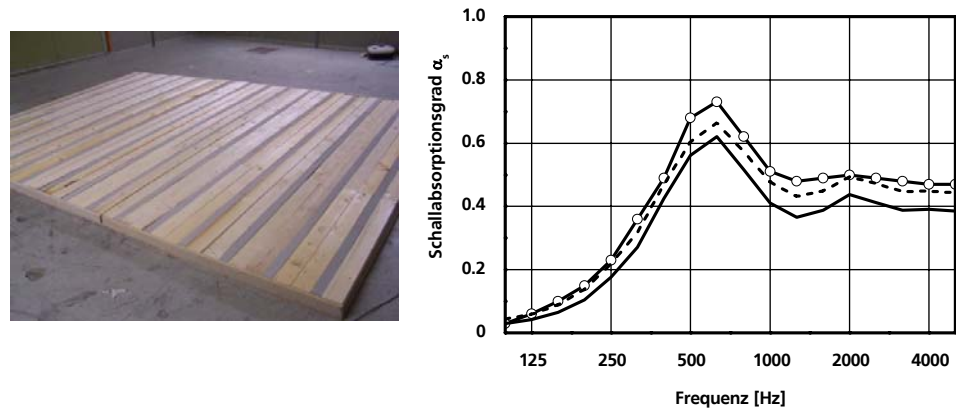


Bild 4: Gemessener (---) Schallabsorptionsgrad bei diffusem Schalleinfall einer Probe aus porösen Glasschaumstreifen und Holzbalken (beide 50 mm tief). $L_2 = 50$ mm, $\Lambda_x = 250$ mm. Berechnung (— bzw. - -).

3.2.2 Thermische Wirksamkeit

Für die Wärmeübertragung einer bauteilaktivierten Decke ist die Oberflächentemperatur maßgeblich. Zur Berechnung wurden Ausschnitte der Geschossdecke in einem FEM-Programm modelliert, wobei für die Raum- und Kühlflüssigkeitstemperaturen Tagesgänge anlagen (Bild 1). Der Wirkungsgrad η gibt die Verschlechterung im Vergleich zu einer ungestörten Betondecke an. Die Vorteile des MPA durch die Wärmeableitung des Blechs sind an den Wärmestromlinien deutlich erkennbar.

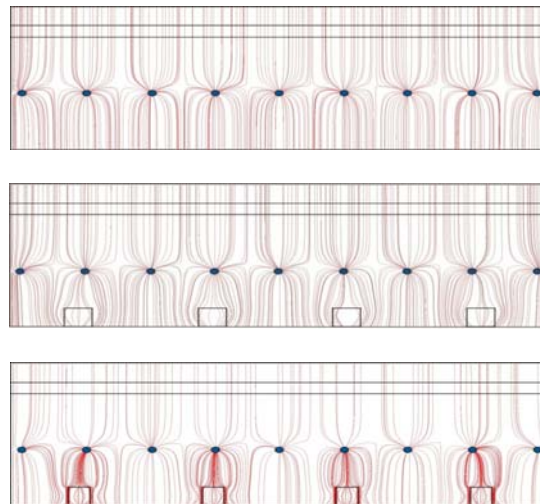


Bild 5: Beispielhafte berechnete Wärmeströme
 Oben: ungestörte Betondecke, $\eta = 100\%$
 Mitte: poröse Glasschaumstreifen, $\eta = 96\%$ ($\Lambda_x = 250$ mm, $L_2 = 50$ mm)
 Unten: Metall-MPA, $\eta = 99\%$ ($\Lambda_x = 250$ mm, $L_2 = 50$ mm)

Die Streifenanordnungen wurden sowohl akustisch als auch wärmetechnisch optimiert. Beispielhaft sind in Bild 6 die Schallabsorptionsgrade und Oberflächentemperaturen für Decken mit Glasschaumstreifen dargestellt. Der Absorberflächenanteil ist bei allen Varianten 20 Prozent. Variiert wurde die Periodenlänge. Der Schallabsorptionsgrad steigt bei schmaler werden Streifen und die Oberflächentemperaturen der Kühldecke sinken.

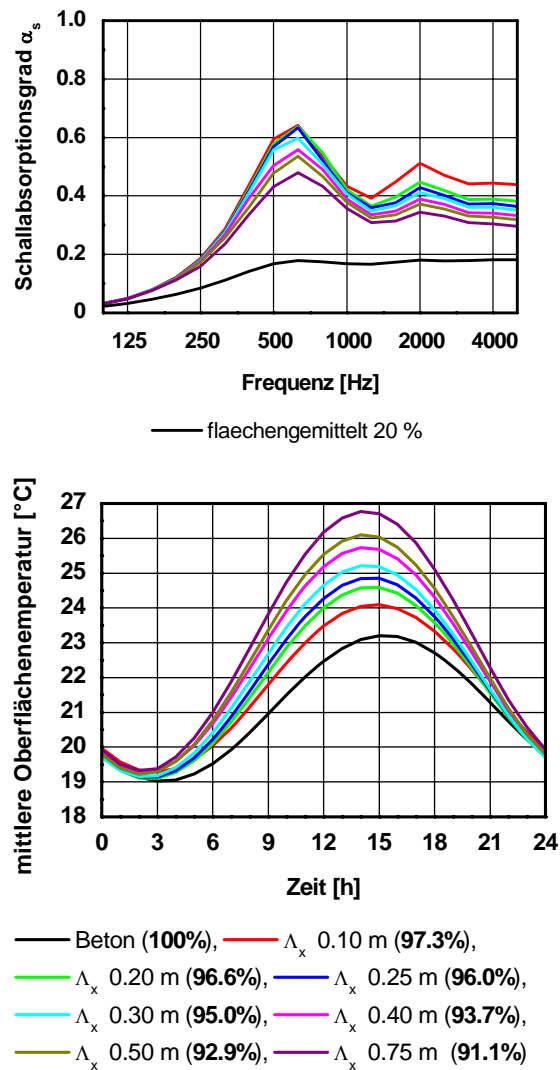


Bild 6: Berechneter Schallabsorptionsgrad (oben) und mittlere Oberflächentemperatur samt thermischen Wirkungsgrad η eines Betonbauteils versehen mit Streifen aus porisiertem Glas $L_2 = 50$ mm. $\Lambda_x = 250$ mm, $d = 50$ mm, (20% Absorberflächenanteil).

3.3 Untersuchungen an Funktionsmustern

Zur Projektlaufzeit gelang eine erste prototypische Umsetzung im inHaus2 der Fraunhofer Gesellschaft (Bild 7).

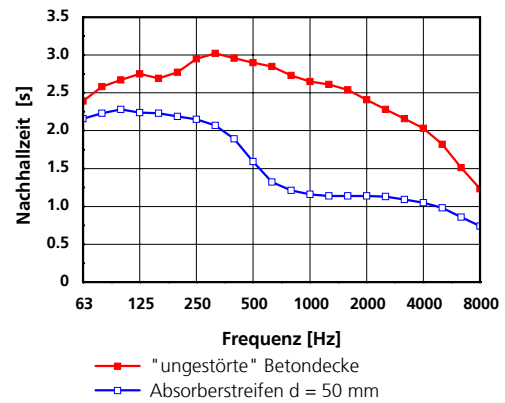


Bild 7: Installierte Absorberstreifen aus porositern Glas in thermisch aktiver Betondecke in einem Mehrpersonenbüro [5] und gemessene Nachhallzeiten mit und ohne Absorberstreifen.

In einer Etage mit Büroräumen konnte so ein erster Funktionsnachweis geführt werden. Dabei wurden Ansätze für eine kostengünstige und baustellengerechte Montage in einer Ortbetondecke gewonnen.

- [1] Lord Rayleigh, "On the Dynamical Theory of Gratings," Proc. R. Soc. London A 79 (532) 399 – 416 (1907)
- [2] Brillouin L.: Wave Propagation in Periodic Structures, Dover Publications, 1953, 140
- [3] Takahashi D.: Excess Sound Absorption due to Periodically Arranged Absorptive Materials, J. Acoust. Soc. Am. 86 (6), 2215 – 2222 (1989)
- [4] Leistner, P.; Fuchs, H.V.: Schlitzförmige Schallabsorber. Bauphysik 23 (2001), 333-337
- [5] http://www.inhaus-zentrum.de/site_de/index.php?node_id=2216