

F 2738

Horst Drotleff, Roman Wack

Integrale Akustiksysteme für thermisch aktive Betonbauteile – Akustik in Betondecken



Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung

Fraunhofer IRB Verlag

F 2738

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlußberichtes einer vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung -BMVBS- im Rahmen der Forschungsinitiative »Zukunft Bau« geförderten Forschungsarbeit. Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprotechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprotechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2010

ISBN 978-3-8167-8240-7

Vervielfältigung, auch auszugsweise, nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69 70504 Stuttgart

Nobelstraße 12 70569 Stuttgart

Telefon 07 11 9 70 - 25 00 Telefax 07 11 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

www.irb.fraunhofer.de/bauforschung



Bauaufsichtlich anerkannte Stelle für Prüfung, Überwachung und Zertifizierung Zulassung neuer Baustoffe, Bauteile und Bauarten Forschung, Entwicklung, Demonstration 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 - Akustik in Betondecken

Durchgeführt im Auftrag des Bundesamts für Bauwesen und Raumordnung im Rahmen der Forschungsinitiative "ZukunftBau"

Z 6 - 10.08.18.7- 07.35/ II 2 - F20-07-41

Der Bericht umfasst 34 Seiten Text 1 Tabelle 31 Abbildungen im Text 34 Abbildungen im Anhang

Stuttgart, 23. Juni 2009

stelly. Institutsleiter

Dr.-Ing. Philip Leistner

Bearbeiter

Horst Drotleff

Fraunhofer-Institut für Bauphysik Nobelstraße 12 · 70569 Stuttgart Telefon +49 711 970-00 Telefax +49 711 970-3395 www.ibp.fraunhofer.de Institutsteil Holzkirchen Fraunhoferstr. 10 · 83626 Valley Telefon +49 8024 643-0 Telefax +49 8024 643-366 www.ibp.fraunhofer.de Projektgruppe Kassel Gottschalkstr. 28a · 34127 Kassel Telefon +49 561 804-1870 Telefax +49 561 804-3187 www.ibp.fraunhofer.de Inhalt

1	Einleitung	3
2	Ziel des Forschungsvorhabens	3
3 3.1 3.2 3.3	Fachübergreifende Anforderungsdefinition Zielsetzung Funktionale und gestalterische Anforderungen Fazit	4 4 5
4 4.1 4.2 4.3 4.4 4.5 4.6	Wirkprinzipien und Materialien: theoretische Modellierung Zielsetzung Geeignete akustische Wirkprinzipien Theoretische Modellierung des Schallabsorptionsgrades Akustische Parameterstudie Theoretische Modellierung der thermischen Wirksamkeit Fazit	5 6 9 11
5 5.1 5.2 5.3 5.4	Entwicklung und Demonstration von Schallabsorberg für thermisch aktive Betonbauteile Zielsetzung Aufbau von Prototypen Demonstration in situ Fazit	n 15 15 15 17 18
6 6.1 6.2 6.3 6.4 6.5 6.6	Iterative Untersuchung an Funktionsmustern Zielsetzung Akustische Untersuchungen bei senkrechtem Schalleinfall Akustische Untersuchungen bei diffusem Schalleinfall Experimentelle Überprüfung des thermischen Modells Thermische Untersuchungen Fazit	18 19 22 25 27 30
_		
7 7.1 7.2 7.3	Vergleich mit üblichen Ansätzen des Markts Zielsetzung Weitere Ansätze Fazit	30 30 30 31
7 7.1 7.2 7.3 8 8.1 8.2 8.3	Vergleich mit üblichen Ansätzen des Markts Zielsetzung Weitere Ansätze Fazit Handlungshilfen für die praktische Auslegung Zielsetzung Hinweise zur akustischen und thermischen Dimensionierun Fazit	30 30 31 32 32 ng32 33
7 7.1 7.2 7.3 8 8.1 8.2 8.3 9	Vergleich mit üblichen Ansätzen des Markts Zielsetzung Weitere Ansätze Fazit Handlungshilfen für die praktische Auslegung Zielsetzung Hinweise zur akustischen und thermischen Dimensionierun Fazit Zusammenfassung	30 30 31 32 32 ng32 33 33
 7 7.1 7.2 7.3 8 8.1 8.2 8.3 9 10 	Vergleich mit üblichen Ansätzen des Markts Zielsetzung Weitere Ansätze Fazit Handlungshilfen für die praktische Auslegung Zielsetzung Hinweise zur akustischen und thermischen Dimensionierun Fazit Zusammenfassung Literatur	30 30 31 32 32 mg32 33 33 33 34

1 Einleitung

Aus Sicht der Behaglichkeit und Energieeffizienz weist die Raumkonditionierung mittels großer, thermisch aktiver Flächen deutliche Vorteile auf. So lässt sich z.B. mit weniger Energieseinsatz ein gleichmäßigeres Raumklima einstellen. Üblicherweise werden die Decken von Räumen thermisch aktiviert, Stichwort: Betonkernkühlung. Der entscheidende Nachteil dieser Technologie beim Einsatz in kommunikationsintensiv genutzten Räumen (Bürolandschaften, Konferenzund Besprechungsräume, Schulen etc.) sowie in Entwicklungs- und Produktionsstätten ist deren Schall reflektierendes Verhalten. Häufig steht nur die Decke für absorbierende Maßnahmen zur Verfügung, meist ist sie hierfür die wertvollste Fläche. Im Falle einer thermisch aktivierten Betondecke entfällt nun auch diese Möglichkeit! Ohne geeignete Schall absorbierende Maßnahmen stellen sich in Bürolandschaften hohe Schalldruckpegel ein und Schallschirme bleiben ohne Wirkung. In Konferenzräumen wird nur ein Teil dessen verstanden, was vorgetragen wird. In Schulungs- und Schulräumen ist die Sprachverständlichkeit gering mit den bekannten Folgen.

Aktuelle Lösungsansätze (z.B. an Decken montierte Absorberkassetten) weisen hohe thermische Widerstände auf und mindern somit die energetische Effizienz. Sie sind außerdem zerklüftet und werden deshalb innenarchitektonisch kaum akzeptiert. Eine Akustikbelegung von thermisch aktiven Betondecken stellt immer einen schlechten Kompromiss zwischen Akustik und Raumklima dar. Auch die gelegentlich verwendeten Deckensegel reduzieren den Wärmeaustausch und werden von Architekten nur als Notlösung akzeptiert. Letztlich machen alle diese Ansätze auch einen wesentlichen wirtschaftlichen Vorteil der bauteilaktivierten Decke zunichte, nämlich die deutlich verringerte Geschosshöhe durch den Wegfall einer abgehängten Decke.

Die Gliederung des Zwischenberichts entspricht der Einteilung der Arbeitspakete. Jedes Arbeitspaket wird abschließend einzeln zusammengefasst. Die wesentlichen Graphen und Tabellen werden im Bericht selbst gezeigt, die ergänzenden Bilder sind im Anhang dargestellt.

2 Ziel des Forschungsvorhabens

Das Ziel dieses Projekts ist die Entwicklung von Schall absorbierenden Systemen. Diese sollen in Betonbauteile z.B. Betondecken integriert werden und:

- 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 zu stellen und in eine ausgereifte und marktfähige Entwicklung münden.

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. Anderseits ist dies die Voraussetzung für eine flexibel gestaltbare akustische Trennung von Arbeitsplätzen durch Schallschirme.

Ein weiteres Ziel ist, praktische Regeln und Hinweise für die Installation des Systems zu erarbeiten.

3 Fachübergreifende Anforderungsdefinition

3.1 Zielsetzung

Das Ziel dieses Arbeitspakets ist die Definition der Anforderungen aus Sicht der Gestaltung, der Funktionalität (Schallabsorptionsgrad und thermische Verlustleistung) sowie Bauprozess (fehlertolerante Produktion, Haltbarkeit und Sanierbarkeit).

3.2 Funktionale und gestalterische Anforderungen

Eine (nicht repräsentative) Umfrage unter Bauplanern und Architekten hat ergeben, dass thermisch aktive Betondecken ein ebenes und farblich gestaltbares Erscheinungsbild haben sollen. Betonfarbene Decken werden in geringem Ma-Be auch akzeptiert. Eine sehr geringe Akzeptanz haben abgehängte Lösungen.

Über eine Marktstudie wurde festgestellt, dass die meisten Nutzungen mit thermisch konditionierten Decken (betonkernaktivierte Decken und abgehängte Kühldecken) im Büro- und Verwaltungsbereich eingesetzt werden. Damit ist dieser und seine Anforderungen auch entscheidend für den Markterfolg multifunktionaler Betondecken. Im Jahr 2006 wurden in der Bundesrepublik Deutschland 652.000 m² aktive Kühldecken installiert [1]. Dabei sind von der gesamten Deckenfläche ausschließlich die Bereiche berücksichtigt, die aktiv gekühlt werden. Davon entfielen 603.000 m² auf Neubauten, 49.000 m² auf Sanierungen.

Das Potential im Büro und Verwaltungsmarkt ist gewaltig. Im Jahr 2005 wurden in dem Segment Büro- und Verwaltungsbau in der Bundesrepublik Deutschland insgesamt 3.20 Mio. m² Nutzfläche (allgemein mit und ohne Deckenkühlung) fertig gestellt. Dies schließt auch Baumaßnahmen an bestehenden Gebäuden ein. Die Baufertigstellungen von neu erstellten Gebäuden allein belaufen sich auf 2.87 Mio. m² Nutzfläche [2]. Wird eine Nutzfläche von 25 m² pro Arbeitsplatz angesetzt, kann mit ca. 130.000 Arbeitsplätzen in neu erstellten oder sanierten Gebäuden pro Jahr gerechnet werden.

Die akustische Anforderung an Einzelbüros ist vergleichsweise gering, weil die akustische Last klein ist. In Mehrpersonenbüros ist die Sprachverständlichkeit über große Entfernungen die akustische Herausforderung, die es zu bewältigen gilt. Deshalb muss die thermisch aktive Betondecke für diese Nutzung einen hohen Schallabsorptionsgrad bei flachen Einfallswinkeln aufweisen. Er sollte größer 60% im mittleren Frequenzbereich sein. Das für statistischen Schalleinfall gemittelte Schallabsorptionsspektrum sollte die in <u>Bild 1</u> gezeigte Kurve überschreiten. Dieses Spektrum ist unter der Voraussetzung, dass an den Wänden akustische Maßnahmen getroffen werden, auch für Konferenznutzung ge-

eignet. Das ist übrigens eine übliche Vorgehensweise in Konferenz- und Schulungsnutzungen.

Bild 1 Anforderung an das Schallabsorptionsspektrum für Mehrpersonenbüronutzung.



Die thermischen Verluste durch die akustische Funktion sollten so gering wie möglich sein. Ein thermischer Wirkungsgrad von mindestens 90%, bezogen auf das akustisch ungestörte Betonbauteil, wird angestrebt.

Die Anforderungen aus baupraktischer Sicht sind: die einzubauenden akustischen Materialien müssen robust sein, sie müssen sanierfähig d.h. überstreichbar sein und der Einbauprozess muss baustellengerecht sein. Das bedeutet, die Integration der akustischen Funktion in die thermisch aktive Betonbauteile im Betonfertigwerk und vor Ort darf keinen ungewöhnlichen Aufwand bedeuten.

3.3 Fazit

Die wesentlichen Anforderungen an die akustische und thermisch aktiven Betonbauteile sind:

- glatte, ebene und streich- oder putzbare Oberfläche;
- hoher Schallabsorptionsgrad bei schrägem Schalleinfall und mittleren Frequenzen;
- hoher thermischer Wirkungsgrad in der Größenordnung von 90% der thermisch ungestörten Decke;
- leichte Integration auf der Baustelle und im Fertigbetonwerk.

4 Wirkprinzipien und Materialien: theoretische Modellierung

4.1 Zielsetzung

Das Ziel dieses Arbeitsschrittes ist die Auswahl geeigneter Wirkprinzipien, die die unter 3.2 genannten Anforderungen erfüllen. Die ebene Integration von Schallabsorbern in die Betonbauteile und das angestrebte Schallabsorptionsspektrum sind dabei die Herausforderung. Es soll eine akustische und thermi-

5

sche Modellierung der Wirksamkeit der gewählten Prinzipien erfolgen. Auf dieser Basis werden im nächsten Arbeitspunkt Prototypen hergestellt.

4.2 Geeignete akustische Wirkprinzipien

Ausgehend vom Streifenabsorberprinzip [3], das ein inneres Streufeld für erhöhte Schallabsorption ausnutzt, wurde hier ein Absorberstreifenansatz gewählt. Dieser nutzt ein Streufeld an der Oberfläche der Betonbauteile aus und erzielt somit eine deutlich höhere Schallabsorption, als das Flächenmittel zwischen Absorber- und Betonfläche vermuten lässt. Somit kann mit wenig Einsatz von Absorbern (die thermische Isolatoren sind) ein hoher akustischer Wirkungsgrad erreicht werden. Um diese Vermutung zu quantifizieren wurde ein theoretisches Modell entworfen. Es basiert auf der Erkenntnis von Lord Rayleigh [4], dass ein an einer Oberfläche gestreutes Schallfeld, durch eine Summe von harmonischen Wellen zusammen gesetzt werden kann, siehe <u>Bild 2</u>.

Bild 2 Reflexion an einer homogenen Oberfläche (oben). Es entsteht nur eine geometrische Reflexion (R₀).

Reflexion an einer inhomogenen, "gestreiften" Oberfläche. Es entstehen zusätzlich zur geometrischen Reflexion Streuwellen (R_n)





4.3 Theoretische Modellierung des Schallabsorptionsgrades

Das akustische Streufeld wird erzeugt, indem die Betonplatte mit Absorberstreifen versehen wird, siehe <u>Bild 3</u>. Es entsteht an den Schnittstellen zwischen Schall reflektierendem Beton mit der Admittanz¹ A₁ und der Streifenbreite L₁ und Absorbern mit der Admittanz A₂ und der Streifenbreite L₂. Die so entstehende Periode wird mit Λ_x bezeichnet. Im Gedankenexperiment wird angenommen, dass das Betonbauteil unendlich ausgedehnt ist.



Bild 3 Betonbauteil, das mit wenigen Schall absorbierenden Streifen versehen ist.

Auf das Betonbauteil fällt eine ebene Welle mit der Wellenzahl k_0 unter dem Polwinkel θ und dem Azimutwinkel ϕ . Diese Welle wird gestreut und das Schallfeld vor dem Betonbauteil (z < 0) kann nach [4] wie folgt geschrieben werden:

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

Dabei bedeuten α_0 , β_0 , γ_0 die Projektionen der Wellenzahl k_0 auf die kartesischen Koordinaten x, y, z, siehe Bild 3. R_m sind die unbekannten (komplexen) Amplituden der gestreuten Schallwellen und α_m , β_m , γ_m sind deren projizierte Wellenzahlen. Das Zeitglied ist $e^{j\alpha t}$.

Nach Bloch [5] kann die gestreute Wellenzahl entlang der Periode (also in x-Richtung) wie folgt geschrieben werden: $a_m = \alpha_0 + m \cdot 2\pi / \Lambda_x$. Sowohl die Randbedingung als auch die Helmholtzgleichung sind invariant in y-Richtung (quer zur Periode), so dass die Wellenzahl der gestreuten Wellen in y-Richtung gleich der der einfallenden Welle ist, also β_m ist gleich β_0 . Abgesehen von den komplexen Amplituden R_m sind die Wellenzahlen γ_m der gestreuten Wellen in z-Richtung unbekannt. Diese können aus der Helmholtzgleichung bestimmt

7

¹ Die Admittanz kennzeichnet die Fähigkeit eines Materials Schall "anzunehmen"; sie ist der Kehrwert des Schallwiderstandes (Impedanz). Üblicherweise sind Admittanzen frequenzabhängig.

werden: $\gamma_m = \pm \sqrt{k_0^2 - \alpha_m^2 - \beta_0^2}$. Re($\gamma_m > 0$) ergibt ausbreitende Schallwellen und Im($\gamma_m < 0$) ergibt abnehmende oder schwindende Schallwellen in den oberen Halbraum (z < 0) nach Bild 3. Die verbleibenden Unbekannten R_m werden aus der Randbedingung an der Oberfläche (z = 0) bestimmt. Diese ist

$$j\omega\rho_0 \cdot A(x) \cdot p(x, y, z) + \frac{\partial p(x, y, z)}{\partial z} = 0 \Big|_{z=0}.$$
(2)

Dabei sind ω die Kreisfrequenz, ρ_0 die Dichte von Luft und A(x) die Admittanzfunktion der Oberfläche also Absorberstreifen und Betonstreifen, siehe auch Bild 3.

$$A(x) = \begin{cases} A_1, & 0 \le x < L_1 & (z.B.Beton) \\ A_2, & L_1 \le x < L_2 & (z.B.Absorber) \end{cases}$$
(3)

Weil A(x) periodisch ist, kann sie als Fourierreihe dargestellt werden. Diese wird dann in die Randbedingung (Gleichung 2) eingesetzt. Anschließend wird Gleichung (2) mit einer orthogonalen Funktion $e^{-jn\frac{2\pi}{\Lambda_x}x}$ multipliziert und über die Periode Λ_x integriert. Dabei wird die Orthogonalität der Exponentialfunktion berücksichtigt

$$\int_{0}^{\Lambda_{x}} e^{j(m-n)\frac{2\pi}{\Lambda_{x}}x} dx = \begin{cases} \Lambda_{x} : n = m\\ 0 : n \neq m \end{cases}.$$
(4)

Das mündet dann in einem Gleichungssystem mit unendlich vielen linearen Gleichungen mit den unbekannten komplexen Reflexionsfaktoren R_m.

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty} R_m \left(\omega \rho_0 \cdot a_{n-m} + \delta_{m,n} \gamma_m \right) = \omega \rho_0 \cdot a_n + \delta_{0,n} \gamma_0 , \qquad (5)$$

Dabei bedeuten:

$$\delta_{m,n} = \begin{cases} 1 : n = m \\ 0 : n \neq m \end{cases} \text{ and } \delta_{0,n} = \begin{cases} 1 : n = 0 \\ 0 : n \neq 0 \end{cases}.$$
(6)

Damit das Gleichungssystem (5) gelöst werden kann, muss die Anzahl der linearen Gleichungen auf eine endliche Größe N festgelegt werden. Zum numerischen Lösen des Gleichungssystems (5) ist es günstig, wenn die Elemente des Störvektors (rechte Seite der Gleichung (5)) zügig mit zunehmender Gleichungsanzahl n in ihrer Größe abnehmen. In diesem Fall kann das Gleichungssystem auf wenige Gleichungen beschränkt werden. Für eine Streifenanordnung, wie in Bild 3 gezeigt, ist das der Fall. Denn die Fourierkoeffizenten a_n einer Rechteckfunktion, wie sie die Streifen in ihrer Admittanz darstellen, klingen rasch ab, siehe Gleichung (7).

$$A(x) = \sum_{p=-\infty}^{\infty} a_p \cdot e^{\frac{jp^2 - \pi_x}{\Lambda_x}}; \quad a_p = \frac{1}{\Lambda_x} \int_{\frac{-\Lambda_x}{2}}^{\frac{\Lambda_x}{2}} A(x) \cdot e^{-jp\frac{2\pi}{\Lambda_x}x} dx;$$

$$a_p = (A_2 - A_1) \frac{L_2}{\Lambda_x} \cdot \frac{\sin\left(p\pi \frac{L_2}{\Lambda_x}\right)}{p\pi \frac{L_2}{\Lambda_x}} + A_1 \frac{\sin(p\pi)}{p\pi}$$
(7)

Nachdem R_m und γ_m berechnet wurden, kann der winkelabhängige Schallabsorptionsgrad des gestreiften Bauteils nach [6] berechnet werden.

$$\alpha_{\theta,\Phi} = 1 - \sum_{\text{Re}(\gamma_m > 0)} \left| R_m \right|^2 \frac{\gamma_m}{\gamma_0} , \qquad (8)$$

Es werden in Gleichung (8) nur die Streuwellen berücksichtigt, die auch in den Halbraum abstrahlen also die mit $\text{Re}(\gamma_m > 0)$.

4.4 Akustische Parameterstudie

Nach wie vor stellt sich die Frage, wie viele Gleichungen N muss das Gleichungssystem (5) berücksichtigen, um ein valides Ergebnis zu berechnen. Der Einfachheit halber wird das anhand eines Beispiels gezeigt. Für ein Bauteil bestehend aus Perioden mit einem schallharten Streifen also $a_{1^2} = 0$ und einer Breite $L_1 = 0.8$ m sowie $a_2 = 1$ total absorbierend (jeweils frequenzunabhängig) mit $L_1 = 0.2$ m wurde der Schallabsorptionsgrad für senkrechten und diffusen Schalleinfall nach Gleichung (8) berechnet, siehe <u>Bild 4</u> und <u>A-Bild 1</u>. Es ist ersichtlich, dass die Unterschiede im Schallabsorptionsspektrum für N = 15 Gleichungen vernachlässigbar sind. Diese Berechnungen wurden für unterschiedliche Konstruktionen durchgeführt und es wurde festgestellt, dass 15 Gleichungen ein ausreichend genaues Ergebnis liefern. Alle zukünftig dargestellten Ergebnisse sind mit N = 15 berechnet worden. Es wurde auch geprüft, wie viele einfallenden Schallwellen benötigt werden, um den statistischen Schallabsorptionsgrad ausreichend genau zu berechnen. Dabei wurde festgestellt, dass 1000 "Schallstrahlen" zu ausreichend genauen Ergebnissen führen.

² Auf die Kennimpedanz der Luft normierte Admittanz.

Bild 4 Berechneter Schallabsorptionsgrad für senkrechten Schalleinfall in Abhängigkeit der Anzahl der Gleichungen N in (5).

 $\begin{array}{l} L_1=\!0.8\mbox{ m}\ ,\\ L_2=0.2\mbox{ m}\ ,\\ \Lambda_x=\!1.0\mbox{ m}\ ,\\ a_1=0,\ a_2=1\ \lambda_0\ Wellenlänge\ einfallende\ Welle \end{array}$



Eine "gestreifte" Struktur, wie hier untersucht, streut zusätzlich zur geometrischen Reflexion Schall. Dies geschieht zum ersten Mal, wenn die Wellenlänge der einfallenden Schallwelle doppelt so groß ist wie die Periode also $\lambda_0 = 2\Lambda_x$. Wird die Wellenlänge mit $2\pi\Lambda_x$ multipliziert, so kann man von einer normalisierten Wellenlänge sprechen. Dies erleichtert die Darstellung. In diesen Koordinaten entstehen die ersten Streuwellen wenn $2\pi(\Lambda_x/\lambda_0) = \pi$. Das bedeutet

- Die Kondition, ob gestreut wird oder nicht, ist nur abhängig von den Dimensionen der Streifen und nicht von den verwendeten Materialien.
- Je weniger Streuwellen Energie von der Struktur "abtransportieren", desto höher ist der Schallabsorptionsgrad der Struktur. Durch geschicktes Einstellen der Streifenbreiten kann der Schallabsorptionsgrad optimiert werden.

Im Rahmen der Parameterstudie wurde auch der winkelabhängige Schallabsorptionsgrad berechnet. Hier wird er für zwei Situationen gezeigt: $2\pi(\Lambda_x/\lambda_0) = 2$ (Bild 5) die Streukondition ist also nicht erfüllt und $2\pi(\Lambda_x/\lambda_0) = 16$ (<u>A-Bild 2</u>) die Streukondition ist erfüllt.

Bild 5 Berechneter winkelabhängiger Schallabsorptionsgrad nach Gleichungen (5).

 $\begin{array}{l} L_{1}=\!0.8 \text{ m} \ , \\ L_{2}=0.2 \text{ m} , \\ \Lambda_{x}=\!1.0 \text{ m} , \\ a_{1}=0, \ a_{2}=1 \end{array}$

 $2\pi(\Lambda_x/\lambda_0) = 2$



In Bild 5 ist deutlich erkennbar, dass der Schallabsorptionsgrad mit zunehmenden Polwinkel θ ansteigt. Dies ist günstig für Büronutzung, denn somit unterbindet die Decke Reflexionen über große Distanzen. Bei hohen Frequenzen treten Streuwellen ("Rinnen" in A-Bild 2) auf, die den Schallabsorptionsgrad reduzieren.

Weil die Streukondition eine rein geometrische ist, stellt sich die Frage, wie sollen die Streifen ("hart / weich") eingestellt werden, um eine möglichst hohe Schallabsorption zu erreichen? In <u>Bild 6</u> ist der Schallabsorptionsgrad für diffusen Schalleinfall von unterschiedlich breiten Perioden Λ_x bestehend aus denselben Materialien dargestellt.



Zwei Aussagen sind klar in Bild 6 zu erkennen:

- Die "gestreifte" Konstruktion weist einen deutlich höheren Schallabsorptionsgrad auf, als das Flächenmittel erwarten ließe.
- Je schlanker die Periode ist, desto breiter ist das Schallabsorptionsspektrum bei DEMSELBEN Absorbereinsatz.

Das gibt Hoffnung, dass der gewählte Ansatz sowohl akustisch als auch thermisch funktional sein kann. Eine detailliertere Betrachtung des theoretischen Modells und dessen Genauigkeit ist in [7] gezeigt.

4.5 Theoretische Modellierung der thermischen Wirksamkeit

Der Absorberstreifenansatz erfüllt zumindest theoretisch die gestellten akustischen Anforderungen an Büro - und Verwaltungsbaunutzung. Welchen Einfluss haben aber die Streifen auf die thermische Effizienz des Betonbauteils? Wie breit und tief dürfen die Streifen sein und aus welchen Materialien müssen sie bestehen, um die thermischen Anforderungen unter 3.2 zur erfüllen? Um diese Fragen zu beantworten, müssen die instationären, zweidimensionalen Wärmeströme im Bauteil unter bestimmten Randbedingungen berechnet werden. Die Wärmeleitungsgleichung nach Fourier lautet:

$$\frac{\partial}{\partial t}\theta(x,t) = \frac{\lambda}{\rho \cdot c} \cdot \frac{\partial^2}{\partial x^2} \theta(x,t).$$
(9)

 $\partial t = \rho \cdot c$

Dabei bedeuten λ die Wärmeleitfähigkeit, ρ die Rohdichte und **c** die spezifische Wärmekapazität. Für komplizierte Geometrie, wie sie die Absorberstreifen darstellen, ist eine geschlossene Lösung der Gleichung (9) sehr schwer möglich. Deshalb wurde hier mit Hilfe eines FEM-Programms³ das thermische Verhalten der Streifenkonstruktionen untersucht. Dabei wurde absichtlich auf ein Raummodell verzichtet. So ein Modell simuliert einen Raum in einem Gebäude mit einer bestimmten Orientierung und Bauweise. Das wäre willkürlich, denn die Bauart, Bausubstanz und Lage unterscheiden sich deutlich. Stattdessen wird hier die thermische Leistungsfähigkeit einer akustisch optimierten Betonkonstruktion berechnet und verglichen mit derselben Konstruktion ohne akustische Funktionalität. So wird ein thermischer Wirkungsgrad η bestimmt; die akustisch "ungestörte" Decke weist $\eta = 100\%$ auf.



Während für die akustische Betrachtung "nur" die dem Schall zugewandte Oberfläche von Bedeutung ist, muss für die thermische Modellierung das Bauteil in seiner gesamten Tiefe berücksichtigt werden. Es wurde eine übliche Betondecke gewählt, ihr Aufbau ist in <u>A-Bild 3</u> gezeigt. Die Kühlschlangen haben einen Durchmesser von 15 mm, sie haben einen Abstand von 120 mm zueinander und liegen in einer Tiefe von 150 mm.

Die verwendeten Randbedingung sind in <u>Bild 7</u> dargestellt. Sie sind in allen thermischen Berechnungen dieses Vorhabens verwendet worden. Die Temperatur in °C des Mediums in den Kühlschlangen T_B schwankt mit einer Periode von einem Tag nach

$$T_B(t) = \cos\left(\frac{\pi}{12}(t+12)\right) + 19$$
 (10)

³ FEMlab, <u>www.comsol.com</u> Multiphysics Modeling

Der als Last an der Unterseite und Oberseite der Betondecke angelegte Wärmestrom in W/m²schwankt mit derselben Periode nach

$$q_s(t) = 25 \left(\cos\left(\frac{\pi}{12}(t+12)\right) \right) + 25$$
 (11)

Die Breite der Betonbauteile betrug immer vier Perioden, so sind die an den Rändern entstehenden Effekte vernachlässigbar. Die Oberflächentemperatur wurde dabei an jeweils 200 Punkten im 10-Minuten Rhythmus abgespeichert.

Bild 8

Zeitliche und örtliche Temperaturverteilung an der Oberfläche der Betondecke. Diese ist mit porösen Absorberstreifen versehen: $L_1 = 200 \text{ mm}$ $L_2 = 50 \text{ mm}$ $\Lambda_x = 250 \text{ mm}$

Absorberflächenanteil 20%



Für eine Betondecke (Wärmeleitfähigkeit λ_B =2.1 W/mK) versehen mit 50 mm breiten und tiefen Absorberstreifen aus porösem Glasschaum (λ_R =0.088 W/mK) ist die Verteilung der Oberflächentemperatur über sieben Tage in <u>Bild 8</u> dargestellt. Die erhöhten Temperaturen an den Absorberstreifen ist deutlich sichtbar, denn es sind thermische Isolatoren. In <u>A-Bild 4</u> und <u>A-Bild 5</u> ist für dieselben Randbedingungen die Oberflächentemperaturverteilung einer unbehandelten Betondecke und einer Betondecke mit Absorberstreifen auf Metall-MPA gezeigt. Die Spitzentemperaturen sind im MPA-Fall deutlich geringer, denn Metall leitet die Wärme besser in den Beton als der hier verwendete Glasschaum.

Die Darstellung der Ergebnisse in Oberflächentemperaturverteilungen ermöglicht keinen guten Vergleich zwischen verschiedenen Konstruktionen. Deshalb wurde weiter vereinfacht: Weil Menschen im Büro ausreichend entfernt von einer solchen akustisch ertüchtigten Betondecke sitzen, spüren sie die Temperaturunterschiede zwischen den schlanken und wärmeren Absorberstreifen und dem kühleren Beton nicht. So ist es gerechtfertigt, in einem ersten Schritt zur Vereinfachung die Oberflächentemperatur örtlich zu mitteln. Das ergibt nur noch zeitlich abhängige Kurven, wie in <u>Bild 9</u> dargestellt. Bild 9 Zeitlicher Temperaturverlauf an der Oberfläche der Betondecke.

ungestörte Decke
poröse Absorberstreifen
Metallene mikroperforierte Absorberstreifen

Absorberflächen-

anteil jeweils20%



Hierbei ist festzustellen, dass schon nach zwei Tagen die örtlich gemittelte Oberflächentemperatur stabil ist. Um einen Einzahlwert für den thermischen Wirkungsgrad zu erhalten, werden die Oberflächentemperaturen der akustisch konditionierten Varianten zu den Oberflächentemperaturen der ungestörten Betondecke ins Verhältnis gesetzt und gemittelt. Um Einschwingvorgänge zu vermeiden, werden die Werte ab dem dritten Tag verwendet. So entsteht ein Wirkungsgrad oder eine prozentuale Verschlechterung der akustisch konditionierten Decke bezogen auf die Betondecke. Dabei ist zu beachten, dass die Größe des Wirkungsgrads η von den Randbedingungen abhängig ist! Auf diese Weise errechnet sich eine prozentuale Verschlechterung für eine Konstruktion mit der Periode $\Lambda_x = 250$ mm und porösem Glasschaum zu 4% und mit Metall-MPA zu 0.8% beide jeweils 50 mm breit. Die für diese Konfiguration berechneten Wärmeströme verdeutlichen den Wärmefluss um die Schallabsorber (thermischen Isolatoren), siehe <u>Bild 10</u>.

Beispielhaft wurde der Einfluss der Periodenlänge Λ_x auf die akustische und thermische Leistungsfähigkeit berechnet. Als Absorber wurden 50 mm breite poröse Glasschaumstreifen mit einer Tiefe von ebenfalls 50 mm verwendet. Die Berechnung des Schallabsorptionsgrades erfolgte nach Gleichung (8) und der thermische Wirkungsgrad wurde unter den Randbedingungen nach Bild 7 mittels FEM-Modell berechnet. Das Ergebnis ist in <u>Bild 11</u> dargestellt. Bild 10 Berechnete Wärmeströme (Randbedingungen nach Bild 7)

- ungestörte Betondecke, $\eta = 100\%$

- poröse Glasschaumstreifen , $\eta = 96\%$ ($\Lambda_x = 250$ mm, $L_2 = 50$ mm)

- Metall-MPA, , $\eta = 99\%$ ($\Lambda_x = 250$ mm, $L_2 = 50$ mm)



4.6 Fazit

Das Prinzip der Absorberstreifen ist zumindest aus theoretischer Sicht geeignet, die Anforderungen an Gestaltung sowie akustische und thermische Funktionalität zu erfüllen. Es wurde ein theoretisches Modell zur Berechnung des Schallabsorptionsgrades entwickelt. Die thermische Wirksamkeit wurde anhand der Analyse der instationären zweidimensionalen Wärmeströme berechnet. Folgende wesentlichen theoretischen Erkenntnisse können zusammengefasst werden:

- je kleiner die Periode, desto breiter und geeigneter das Schallabsorptionsspektrum (gleiche Menge Absorber vorausgesetzt);
- je kleiner die Periode, desto geringer der thermische Verlust.

5 Entwicklung und Demonstration von Schallabsorbern für thermisch aktive Betonbauteile

5.1 Zielsetzung

Nachdem die theoretische Modellierung Hinweise auf den Aufbau von Bauteilen liefert, sollen auf diesen Erkenntnissen zwei Prototypen hergestellt und im Labor überprüft werden. Es sollen die passenden Materialien ausgesucht werden. Außerdem bot sich die Gelegenheit an, das Absorberstreifenkonzept in situ in einem Experimentalgebäude zu installieren und zu testen.

5.2 Aufbau von Prototypen

Als geeignete Materialien für die Absorberstreifen werden zwei Typen eingesetzt: poröse Absorber (PA) und mikroperforierte Absorber (MPA). Als poröse Absorber wurden ein Faservlies und ein poröser Glasschaum ausgewählt. Ersterer ist leicht zu handhaben und liefert schnelle Ergebnisse im Labor, während letzterer sowohl farblich als auch stofflich für eine Integration in Beton gut geeignet ist. Eine Vorabberechnung zeigt, dass bei gleichem Flächeneinsatz von porösem Glasschaum, schlanke Perioden ein höheres Schallabsorptionsspektrum aufweisen als breitere, siehe Bild 11. Die Admittanz zur Eingabe in Gleichung (5) für porösen Glasschaum wurde nach [8] modelliert.

Bild 11

Berechneter Schallabsorptionsgrad (oben) und mittlere Oberflächentemperatur samt thermischen Wirkungsgrad η eines Betonbauteils versehen mit Streifen aus porosiertem Glas L₂ = 50 mm A_x = 250 mm d = 50 mm (20% Absorberflächenanteil).



Als MPA wurde ein perforiertes, transparentes Plexiglas sowie eine perforierte Metallplatte verwendet. Letztere wurde auch aus thermischen Gründen ausgewählt. Die Admittanz zur Eingabe in Gleichung (5) für porösen Glasschaum wurde nach [9] modelliert. Um den Aufwand und den Nutzen von Prototypen abzuschätzen, lohnt ein Vergleich zwischen dem berechneten Schallabsorptionsgrad von Streifenkonstruktionen aus porösem Glasschaum und metallenen MPA, siehe <u>Bild 12</u>.



Hier ist ersichtlich, dass selbst eine MPA Belegung in Streifen mit 75% einen geringeren Schallabsorptionsgrad erreicht als eine 20% Belegung mit porösem Glasschaum. Für die Laboruntersuchungen wurde der im Wesentlichen schallharte Beton durch Holzbohlen substituiert. Einige Prototypen mit porösen und mikroperforierten Absorberstreifen sind in <u>A-Bild 6</u> bis <u>A-Bild 10</u> gezeigt.

5.3 Demonstration in situ

In einem Projekt der Fraunhofer-Gesellschaft [10] bot sich an, den Absorberstreifenansatz gleich in situ zu realisieren und zu überprüfen⁴. In die Decke einer Etage mit Einzel- und Mehrpersonenbüronutzung wurden porosierte Glasschaumstreifen als Absorber integriert. 20% der Deckenfläche wurden mit 50 mm breiten und teilweise 25 mm bzw. 50 mm tiefen Absorberstreifen versehen (<u>A-Bild 11</u>).

Bild 13

Gemessene Nachhallzeit in einem Mehrpersonenbüro [10] mit und ohne Absorberstreifen in der thermisch aktiven Betondecke.

Die Tiefe der Absorberstreifen d beträgt 50 mm



⁴ Dies wurde in Zusammenarbeit mit der Firma HOCHTIEF AG getan.

Die Nachhallzeit wurde in der Etage mit Absorberstreifen integriert in der thermisch aktiven Betondecke und in einem vergleichbaren Raum mit schallharter thermisch aktiver Betondecke gemessen. Das Ergebnis ist in <u>Bild 13</u> dargestellt. Der Einfluss der Decke auf die Nachhallzeit ist deutlich sichtbar und auch hörbar. Die thermische Leistungsfähigkeit der Decke mit Absorberstreifen wurde rechnerisch ermittelt, siehe 4.5. Sie beträgt 96% der thermisch ungestörten (also schallharten) Decke.



In <u>Bild 14</u> ist die gemessene Nachhallzeit mit und ohne Absorberstreifen in der Betondecke für ein Einzelbüro dargestellt. Um auch gestalterischen Ansprüchen zu genügen, wurde in einem Einzelbüro die Decke mit einem dünnen Akustikputz versehen (<u>A-Bild 12</u>). In diesem Fall beträgt die thermische Leistungsfähigkeit noch 93%.

5.4 Fazit

Es wurden Prototypen auf Holzbasis hergestellt. Als geeignete Absorber wurden poröse Absorber und mikroperforierte Absorber identifiziert. Eine Demonstration des Absorberstreifenansatzes in situ zeigt erfolgreich dessen Potential.

6 Iterative Untersuchung an Funktionsmustern

6.1 Zielsetzung

Die Funktionalität der Prototypen soll im Labor untersucht werden. Dabei soll eine experimentelle Parametervariation durchgeführt werden. Auf Basis dieser Ergebnisse sollen die theoretischen Modelle validiert und sofern notwendig angepasst werden. Dann werden die am besten geeigneten Konstruktionen identifiziert.

Aus prozessökonomischer Sicht soll erst der Schallabsorptionsgrad bei senkrechtem Schalleinfall und kleinen Proben gemessen werden. Hier sollen unterschiedliche Absorberprinzipien mittels Streifenansatz überprüft werden. Anschließend soll bei diffusem Schalleinfall der Schallabsorptionsgrad an großen Proben im Hallraum bestimmt werden. Um die Genauigkeit des theoretischen Modells zur thermischen Leistungsfähigkeit zu überprüfen, sollen experimentelle Untersuchungen in einer Doppelklimakammer durchgeführt werden.

Letztendlich soll für die verschiedenen Aufbauten die akustische und thermische Wirkung verglichen werden. Der Einfluss der geometrischen und Materialparameter auf den akustischen und thermischen Wirkungsgrad soll quantifiziert werden, so dass Empfehlungen für die Praxis (siehe Kap. 8) abgeleitet werden können.

6.2 Akustische Untersuchungen bei senkrechtem Schalleinfall

Um das akustische Modell und die Berechnung des Schallabsorptionsgrades nach Gleichung (8) zu überprüfen, wurden erst flächige Metall-MPA in einem Impedanzrohr untersucht. Der Schallabsorptionsgrad von mikroperforierten Absorbern ist durch dessen Geometrie bestimmt. Die hier verwendeten Platten hatten einen Lochdurchmesser von d = 0.43 mm, Lochabstand $\Delta x = \Delta y = 5$ mm



und Plattendicke von t = 0.53 mm. Der (Luft)Abstand D zur Wand hinter dem Absorber wurde variiert. Der hier experimentell bestimmte Schallabsorptionsgrad ist in <u>Bild 15</u> dargestellt. Der dazugehörige Messbaufbau ist in <u>A-Bild 13</u> ersichtlich. Für die Berechnung nach Gleichung (8) (auf Basis von (5)) wurde der MPA in drei Streifen gleicher Breite mit demselben Abstand D zur Rückwand eingeteilt. Die Übereinstimmung zwischen Rechen- und Messwert ist gut.

Das Experiment wurde wiederholt, indem die drei MPA-Streifen in derselben Ebene liegen, siehe <u>A-Bild 14</u>, jedoch hatte jeder Streifen einen eigenen Abstand D zur Rückwand. Dieses Messergebnis mit dazugehörigem Rechenergebnis ist in <u>Bild 16</u> gezeigt. Bild 16 Schallabsorptionsgrad bei senkrechtem Schalleinfall eines Metall-MPA bestehend aus drei Streifen mit unterschiedlichem Abstand D zur Rückwand. Messwerte sind als Punkte dargestellt und die Berechnung als Linie.



Dieses Experiment hat gezeigt, dass der Streifenansatz auch bei drei unterschiedlich abgestimmten Resonatoren (MPA) funktioniert und der resultierende Schallabsorptionsgrad größer als der des Flächenmittels ist. Auch hier ist die Übereinstimmung zwischen Mess- und Rechenergebnis gut.

Im nächsten Schritt wurde der MPA mit einer schallharten Fläche aus Holz (simuliert akustisch den Beton) untersucht. Das Ergebnis des Experiments und der dazugehörenden Berechnung des Schallabsorptionsgrades ist in <u>Bild 17</u> dargestellt. Ein Foto des Messaufbaus zeigt <u>A-Bild 15</u>. Der Schallabsorptionsgrad der Streifenkonstruktion ist deutlich höher als das Flächenmittel. Auch hier zeigt sich, dass Gleichung (8) (auf Basis von (5)) den Schallabsorptionsgrad ausreichend genau vorhersagt.



Obwohl aus thermischer Sicht alles für den Einsatz von Metallabsorberstreifen spricht, erscheint die praktische Integration eine Herausforderung. Deshalb

wurde auch das Verhalten von porösen Glasschaumstreifen untersucht. Wie bei der MPA-Platte wurde das Modell an einer homogenen Schicht (siehe <u>A-Bild 16</u>) des porösen Absorbers getestet. Die Berechnung erfolgte nach Gleichung (8) indem die Probe in vier Streifen eingeteilt wurde. In <u>Bild 18</u> ist das erzielte experimentelle und theoretische Ergebnis dargestellt. Die Übereinstimmung ist gut, so dass ein Streifenansatz (siehe <u>A-Bild 17</u>) untersucht wurde. Wieder wurde Beton durch Holzbalken substituiert. Das Mess- und Rechenergebnis ist in <u>Bild 19</u> gezeigt. Die Übereinstimmung zwischen Theorie und Experiment ist gut und wieder zeigt sich das Potential des Absorberstreifenansatzes. Dessen Absorptionsspektrum ist deutlich höher, als das Flächenmittel erwarten ließe.



Das Schallabsorptionsspektrum dieser Konstruktion ist geeignet, um die gestellten akustischen Anforderungen zu erfüllen. Zusätzlich zu Untersuchungen mit porösem Glasschaum wurde als Absorber auch ein Faservlies verwendet. Sein Strömungswiderstand ist geringer als der des Glasschaums und sein Vorteil ist, dass es leicht (auch nachträglich) in Bauteile integriert werden kann. Einer aus der Vielzahl der untersuchten Aufbauten ist in <u>A-Bild 18</u> gezeigt. Die dazu erzielten Ergebnisse zeigt <u>Bild 20</u>. Es ist deutlich erkennbar, dass in diesem Fall die theoretischen Werte das gemessene Spektrum nicht vorhersagen können. Das liegt daran, dass sich genau wie vor dem Absorberstreifen auch in dem (leicht gedämpften) Absorberstreifen ein Streufeld ausbreitet, dass in dem Ansatz unter 4.3 nicht berücksichtigt wird. Hierzu wäre eine Ergänzung notwendig.



6.3 Akustische Untersuchungen bei diffusem Schalleinfall

Die experimentellen Ergebnisse bei senkrechtem Schalleinfall haben den gewählten Absorberstreifenansatz bestätig. Somit wurden auch große Proben hergestellt, die im Hallraum unter diffusem Schalleinfall gemessen wurden. Es wurden zwei Klassen untersucht: Kombinationen mit porösem Glasschaum und mit mikroperforierten Absorberstreifen. Jedoch wurde zuerst an einer homogenen Probe bestehend aus porösem Glasschaum das Modell für diffusen Schalleinfall getestet. Das Messergebnis ist in <u>Bild 21</u> dargestellt. Bild 21 Schallabsorptionsgrad bei diffusem Schalleinfall einer homogenen Probe aus porösem Glasschaum Messwerte sind als Punkte dargestellt und die Berechnung als Linie.



Deutlich zu erkennen ist der Unterschied zwischen den berechneten und den gemessenen Werten. Der Unterschied wird auf den Kanteneffekt zurück geführt, der zu höheren Messergebnissen führt.

Es wurde ein Prototyp aus porösen Glasschaumstreifen und Holzbalken hergestellt und im Hallraum (<u>A-Bild 19</u>) untersucht. Wie bisher auch sollen die Holzbalken Beton simulieren. Deren Schallabsorptionsgrad ist in [7] beschrieben. Die Periode betrug $\Lambda_x = 250$ mm und die Breite der Absorberstreifen L₂ =50 mm. Das entspricht einem Flächenanteil Absorber von 20%.

Bild 22 Schallabsorptionsgrad bei diffusem Schalleinfall einer Probe aus porösen Glasschaumstreifen und Holzbalken (beide 50 mm tief). $L_2 = 50 \text{ mm},$ $\Lambda_x = 250 \text{ mm}$ Messwerte sind als Punkte und die Berechnung als durchgezogene oder gestrichelte Linie dargestellt.



Wie in Bild 5 und A-Bild 2 gezeigt, ist der Schallabsorptionsgrad einer gestreiften Konstruktion stark abhängig vom Einfallswinkel. Je flacher der Einfallswinkel desto höher der Schallabsorptionsgrad. Dies gilt bis etwa $\theta = 87^{\circ}$. Im Hallraum wird ein möglichst diffuses Schallfeld angestrebt. Dennoch sind sehr flache Einfallswinkel über $\theta = 85^{\circ}$ seltener vertreten. Deshalb wurde die Berechnung nach Gleichung (5) sowohl bis $\theta = 78^{\circ}$ als auch bis $\theta = 85^{\circ}$ durchgeführt. Bild 23 Schallabsorptionsgrad bei diffusem Schalleinfall einer Probe aus porösen Glasschaumstreifen und Holzbalken (beide 50 mm tief). $L_2 = 50 \text{ mm},$ $\Lambda_x = 150 \text{ mm}$ Messwerte sind als Punkte und die Berechnung als durchgezogene oder gestrichelte Linie dargestellt.



Der Schallabsorptionsgrad, berechnet für den höheren maximalen Einfallswinkel, ist entsprechend größer (<u>Bild 22</u>). Die Schallabsorption der Konstruktion ist bei nur 20% Absorberflächenbelegung hoch. In Anbetracht des immer im Hallraum auftretenden Kanteneffekts ist die Übereinstimmung zwischen experimentellem und theoretischem Ergebnis gut. Auch wenn der Flächenanteil des Absorbers auf 33% erhöht wird ($\Lambda_x = 150$ mm und $L_2 = 50$ mm, siehe <u>A-Bild</u> <u>20</u>) zeigt die Modellierung eine ausreichend gute Übereinstimmung mit den experimentellen Ergebnissen (<u>Bild 23</u>). Im Falle einer Streifenbelegung mit einem Drittel Absorber ist der Schallabsorptionsgrad der gestreiften Konstruktion beeindruckend hoch.

Dieselbe Untersuchung wurde auch an mikroperforierten Absorberstreifen durchgeführt, siehe <u>A-Bild 21</u>. Aus Gründen des Materialzuschnitts wurden vergleichsweise breite Perioden ($\Lambda_x = 800$ mm und $L_2 = 300$ mm) untersucht. Entsprechend ist der Schallabsorptionsgrad nicht bemerkenswert hoch (<u>Bild 24</u>). Je schmaler die Absorberstreifen (derselbe Flächeneinsatz vorausgesetzt) desto höher der Schallabsorptionsgrad, siehe z.B. Bild 11. Auch für diese Absorbergattung gelingt die theoretische Vorhersage des Schallabsorptionsgrades bei diffusem Schalleinfall.



6.4 Experimentelle Überprüfung des thermischen Modells

Um die thermischen Simulationen messtechnisch zu validieren, wurden zwei Prüfkörper aus Beton mit integrierten Absorberstreifen hergestellt (<u>A-Bild 22</u> und <u>A-Bild 23</u>). Die Betonkörper wurden in einem Trockenschrank bis zur Massenkonstanz getrocknet. Anschließend wurden sie dicht in eine Doppelklimakammer eingebaut. Details zu den Versuchsaufbauten sind detailliert in [11] gegeben. Sowohl im feuchten als auch im getrockneten Zustand wurde die Wärmeleitfähigkeit des Betons in einem Plattengerät gemessen. Sie betrug $\lambda_{feucht} = 1.03$ und $\lambda_{feucht} = 0.95$ W/mK. An den Oberflächen und im Inneren der Proben wurden Thermoelemente montiert. An der warmseitigen Oberfläche wurden zusätzlich auch Wärmestrommesser installiert. Die Positionierung der Messfühler ist in <u>A-Bild 24</u> dargestellt. Fotos der Anordnung sind in <u>A-Bild 25</u> gezeigt.

Die thermischen Messungen erfolgten nach folgendem Schema: erst wurden beide Kammern des Labors auf 21°C eingestellt, anschließend wurde die Temperatur im "kalten" Raum schlagartig auf 0°C reduziert, um dann nach geraumer Zeit wieder auf 21°C erhöht zu werden. Die experimentell bestimmten Lufttemperaturen beider Kammern ist in <u>A-Bild 26</u> gezeigt.

Wie eingangs erläutert, ist eine FEM-Berechnung die gewählte Vorgehensweise, den thermischen Wirkungsgrad zu bestimmen. Um die Genauigkeit dieser Berechnungen zu prüfen, wurden die Randbedingungen und die Geometrie der Prüfkörper in das FEM-Programm eingegeben. Für Beton wurde die oben genannte Wärmeleitfähigkeit und für den Glasschaum 0.077 W/mk verwendet. Als Wärmeübergangskoeffizient wurde wegen der erhöhten Luftzirkulation 15 W/mK angesetzt. In <u>Bild 25</u> sind die gemessenen und die berechneten Oberflächentemperaturen an einem Beton- und einem Absorberstreifen der Probe P1 dargestellt. Die Rechnung prognostiziert die Messwerte sehr genau. Die Differenz zwischen Rechen- und Messergebnis auf dem Absorberstreifen ist geringfügig größer. Dies wird auf die schwierigen Montagebedingungen des Temperaturfühler an der porösen Oberfläche zurück geführt.

Bild 25 Berechnete und gemessene Oberflächentemperaturen an einem Beton- und einem Absorberstreifen der Probe P1.



Es wurden auch im Inneren der Betonkörper Temperaturfühler angebracht, siehe A-Bild 24. Auch für diese Positionen wurde der Vergleich zwischen Messund Rechenergebnis durchgeführt. In <u>A-Bild 27</u> sind die Ergebnisse innerhalb des Betonstreifens und in <u>A-Bild 28</u> die in Absorberebene jeweils in verschiedenen Tiefen für Probe P1 gezeigt. Die äußeren Messstellen zeigen einen guten Vergleich Experiment zu Theorie, nur die in 10 cm Tiefe weist geringfügige Differenzen auf.

Die auf der Warmseite gemessenen und berechneten Wärmeströme sind für Probe P1 in <u>Bild 26</u> gezeigt. Die für den Betonstreifen ermittelten Rechenergebnisse passen auffallend gut mit den experimentellen Ergebnisse überein. Für den Wärmestrom auf dem Absorberstreifen ist das nicht der Fall. Die Diskrepanz ist deshalb so deutlich, weil der Untergrund, auf den der Wärmestrommesser aufgebracht wurde, heterogen (Blähglaskugeln und Luftporen) ist.

Die Ergebnisse für die Oberflächenflächentemperaturen von P2 sind in <u>A-Bild 29</u> dargestellt. Und die für die Wärmeströme auf der Warmseite von P2 sind in <u>A-Bild 30</u> gezeigt.

Insgesamt konnten die experimentellen Ergebnisse rechnerisch ausreichend gut simuliert werden, so dass die Bestimmung des thermischen Wirkungsgrades der Betonbauteile mit Absorberstreifen nur noch rechnerisch erfolgt. Bild 26 Berechnete und gemessene Wärmeströme an der Oberfläche eines Betonstreifen (oben) und eines Absorberstreifens (unten) der Probe P1.



6.5 Thermische Untersuchungen

Es ist schon gezeigt worden, dass sowohl die akustische als auch die thermische Wirksamkeit mit kleineren Perioden Λ_x bei gleichem Absorbereinsatz zunimmt, siehe Bild 11. Dies gilt zumindest für poröse Absorber. Wie verhält sich der thermische Wirkungsgrad, wenn sich der Absorberanteil erhöht? In <u>A-Bild 31</u> ist der Isothermenverlauf für ein Betonbauteil mit einem 50 mm und einem 100 mm breiten porösen Absorberstreifen gezeigt. Es ist deutlich erkennbar, dass beim breiteren Streifen die Oberflächentemperatur höher als beim schlanken Streifen ist. Je schlanker die Streifen, desto leichter kann der Wärmestrom um das Hindernis fließen. Für eine Betonkonstruktion mit 50 mm tiefen und auch breiten Glasschaumstreifen wurde der Absorberflächenanteil variiert, indem die Periodenlänge geändert wurde, siehe <u>Bild 27</u>. Eine Erhöhung des Absorberanteils führt zu einer deutlichen Erhöhung der mittleren Oberflächentemperatur (vergleiche mit Bild 11). Außerdem wird die maximale Oberflächentemperatur auch früher am Tag erreicht.

Aus akustischer Sicht könnte der Absorber auch aus künstlichen Mineralfasern bestehen. Deren Wärmeleitung ist jedoch geringer als die von porösem Glasschaum. So ergibt sich für 50 mm breite und tiefe Absorberstreifen bei einer





Eine wesentliche gestalterische Anforderung ist, glatte Decken herzustellen. Die "Streifenbauteile" sind zwar eben, aber die Absorberstreifen sind optisch erkennbar. So wurde untersucht, wie stark ein akustisch transparenter Deckputz die thermische Wirksamkeit verringert. Die angenommene Beschichtung weist eine Dicke von 1.5 mm und eine Wärmeleitfähigkeit von 0.04 W/mK auf. Als Streifenkonstruktion wurden 50 mm breite und tiefe poröse Glasschaumstreifen und eine Periodenlänge Λ_x = 250 mm angenommen (Absorberflächenanteil 20%). Der Putz als thermischer Isolator reduziert den thermischen Wirkungsgrad von 96% auf 92%, siehe Bild 28. Somit bestimmt er maßgeblich den thermischen Wirkungsrad und zwar so viel, als ob der Absorberflächenanteil auf 40% erhöht werden würde!



Bild 27

variiert.



Es wurde auch der thermische Wirkungsgrad von Streifenkonstruktionen aus metallenen MPA eingebettet in Beton berechnet. Die MPA sind 0.5 mm dick

und der Hohlraum hinter ihnen wurde zu 50 mm gesetzt. Der Lochflächenanteil der MPA beträgt weniger als 1%, so dass die Luftschicht im Hohlraum als ein ruhender Isolator (keine Luftkonvektion) betrachtet werden kann. Der äquivalente Wärmewiderstand wurde nach [12] berechnet. Auch hierfür wurde ein Isothermenverlauf berechnet. In <u>A-Bild 33</u> ist er für einen 50 mm und einen 100 mm breiten Streifen für 12 Uhr mittags gezeigt. Wie durch das Wärme leitende Material zu erwarten war, sind die Oberflächentemperaturen deutlich geringer als die in der porösen Glasschaum Konfiguration.

Bild 29 Berechnete mittlere Oberflächentemperatur in Abhängigkeit vom Absorberflächenanteil (metallene MPA) der zwischen 10% und 75% variiert. Der Absorberstreifen L₂ blieb konstant 50 mm, die Periodenlänge Λ_x wurde variiert.



Wird der Absorberflächenanteil mit metallenen MPA variiert, so kann festgestellt werden, dass selbst hohe Absorberbelegungen den thermischen Wirkungsgrad nur vergleichsweise geringfügig reduzieren, siehe <u>Bild 29</u>. So beträgt in diesem Falle der thermische Wirkungsgrad bei der maximalen Absorberbelegung von 75% noch 97.5%. Jedoch ist zu beachten, dass der akustische Wirkungsgrad der MPA schlechter ist als der mit porösen Absorberstreifen, siehe Bild 12.

Bild 30

Skizze Erhöhung der MPA-Streifenbreite L_2 bei konstanter Periode Λ_x . Berechnete mittlere Oberflächentemperatur in Abhängigkeit vom Absorberflächenanteil (metallene MPA) der zwischen 10% und 60% variiert.



Wenn die Periode Λ_x konstant gehalten und der Absorberstreifen L_2 vergrößert wird, so kann der Anteil an metallenen MPA auf 50% der Deckenbelegung ansteigen, bevor die Oberflächentemperaturen dieselbe Größe wie die bei 20% Deckenbelegung mit porösen Absorbern erreichen, siehe <u>Bild 30</u>.

6.6 Fazit

Das akustische Modell wurde bei senkrechtem und diffusem Schalleinfall mit experimentellen Ergebnissen verglichen. Für Streifenansätze aus porösem Glasschaum und mikroperforierten Absorbern sind die Vorhersageergebnisse ausreichend genau. Für poröse Materialien mit geringem Strömungswiderstand muss der Ansatz auch in die "Kammer" des Absorberstreifens erweitert werden.

Das gewählte theoretische thermische Modell wurde experimentell validiert. Die Genauigkeit ist ausreichend gut.

Der Einfluss von geometrischen und Materialparameter auf das Schallabsorptionsspektrum sowie den thermischen Wirkungsgrad (nach Kap. 4.5) wurde experimentell und auch rechnerisch quantifiziert. Bei gleich bleibender Absorberbelegung steigt der thermische Wirkungsgrad und auch das Schallabsorptionsspektrum, je kleiner die Periode Λ_x ist. Betonbauteile mit porösen Absorberstreifen können mit einem Putz versehen werden. Dessen thermischer Einfluss ist bedeutend und entspricht der Erhöhung der Absorberbelegung um etwa 100%. Metallene MPA weisen einen hervorragenden thermischen Wirkungsgrad auf. Jedoch ist deren Schallabsorptionsspektrum selbst bei 75% Belegung noch geringer als das von porösen Absorberstreifen bei 20% Belegung.

7 Vergleich mit üblichen Ansätzen des Markts

7.1 Zielsetzung

Das Ziel ist die akustischen und thermischen Eigenschaften des Absorberstreifenansatzes mit denen etablierter Lösungen zu vergleichen. Auch die Gestaltungsmöglichkeiten und die baupraktische Integration sollen erörtert werden. Die Kosten für alle Ansätze sind stark objektabhängig. Dennoch wird der Versuch unternommen, die verschiedenen Ansätze ökonomisch zu vergleichen.

7.2 Weitere Ansätze

Die üblichen Ansätze können in drei Gruppen eingeteilt werden: abgehängte Segel, abgehängte Baffles und in oder auf das Betonbauteil aufgebrachte Absorber. Zu der ersten Gruppe gehören z.B. transparente, mikro- bzw. makroperforierte Segel oder abgehängte Stoffe. Der wesentliche Repräsentant der zweiten Gruppe besteht aus abgehängten Schaumstoffblöcken. Und in der dritten Gruppe sind in bzw. auf Betondecken installierte, Wärme leitende Absorbersysteme zu finden. Eins ist allen Elementen dieser Gruppen gemeinsam: sie verwenden vergleichsweise viel Platz für Schallabsorber. In folgender <u>Tabelle 1</u> wird der hier beschriebene, integrierte Absorberstreifenansatz mit den o.g. Systemen verglichen. Dabei wird eine Konstruktion bestehend aus porösem Glasschaum-Streifen (20% Flächenbelegung), verputzt mit einem akustisch durchlässigen 1.5 mm dicken Putz. Als Kriterien werden die unter Kapitel 3.2 genannten Anforderungen verwendet.

Tabelle 1

Vergleich der funktionalen, gestalterischen und ökonomischen Eigenschaften des Absorberstreifenansatzes mit vorhandenen Lösungen.

	Schallabsorption	Thermischer Wirkungsgrad⁵	Gestaltung	
Absorberstreifen	ausreichend	mindestens 90%	glatt und eben: erfüllt die Anfor- derungen von Architekten	
Gruppe I	ausreichend bei hoher Flä- chenbelegung	sinkt bei hoher Flächen- belegung unter 90%;reduziert Konvekti- on im Raum	erfüllt bedingt die Anforderungen	
Gruppe II	ausreichend	reduziert Konvektion im Raum	nur für anspruchslose Räume ge- eignet	
Gruppe III	ruppe IIIunklare Angaben der ausreichend bei hoher Flächenbe- legungunklare Angaben der Hersteller; verschiebt durch hohen Flächen- verbrauch die Phase der Oberflächentemperatur;sofern integriert in da teil werden die Anfor erfüllt; auf Putz mont me weisen dieselben wie Gruppe I und II a		sofern integriert in das Betonbau- teil werden die Anforderungen erfüllt; auf Putz montierte Syste- me weisen dieselben Nachteile wie Gruppe I und II auf	

	Bauliche Integration	Kosten ⁶	Sanierungs- fähigkeit	Neu-/Altbau ge- eignet
Absorberstreifen	einfach, muss aber vorab geplant werden	100%	einfach	Neubau
Gruppe I	sehr einfach	je nach Material (transparente MPA) 130% und Stoffe 80%	sehr einfach	Neu- und Altbau
Gruppe II	sehr einfach	50% bis 100%	sehr einfach	Neu- und Altbau
Gruppe III	Auf Putzsysteme einfach; integrierte Systeme wie Absorberstreifen	ca. 80% bis 200%	einfach	Auf Putzsysteme: Neu- und Altbau; integrierte Syste- me wie Absor- berstreifen

7.3 Fazit

Der Absorberstreifenansatz ist aus Sicht der akustischen und thermischen Funktionalität den marktüblichen Lösungsansätzen ebenbürtig bei gleichzeitig niedrigem Einsatz von Schallabsorbern (thermischen Isolatoren). Jedoch erfüllt er mit seinem ebenen Erscheinungsbild die gestalterischen Wünsche der Architektenschaft. Hier sind ihm die meisten marktüblichen Lösungen unterlegen. Die abgehängten Systeme können je nach gewähltem Material aber deutlich güns-

⁵ Nach Kapitel 4.3

⁶ Material- und Montagekosten; der Absorberstreifenansatz wird als 100% gesetzt und die anderen Ansätze werden damit verglichen

tiger installiert werden. Der Absorberstreifenansatz ist in seiner ebenen Form nur im Neubau einsetzbar.

8 Handlungshilfen für die praktische Auslegung

8.1 Zielsetzung

Um dem Absorberstreifenansatz einen Weg in die Praxis zu bahnen, sollen Hinweise für die Auswahl der Materialien und Geometrie der Streifen gegeben werden. Es soll ein aus akustischer und thermischer Sicht vernünftiger Kompromiss gezeigt werden.

8.2 Hinweise zur akustischen und thermischen Dimensionierung

Poröse Absorber eignen sich gut als Material für die Absorberstreifen. Je schlanker die Streifen, desto höher das Schallabsorptionsspektrum und desto höher der thermische Wirkungsgrad. Als guter Kompromiss zwischen akustischen und thermischen Anforderungen haben sich 50 mm breite Absorberstreifen mit einer Tiefe von 50 mm in einer Periode von 250 mm also einer Belegung von 20% erwiesen. Dieser Kompromiss ist so vernünftig, dass es weder aus akustischer noch aus thermischer Sicht Sinn hat, die geometrischen Verhältnisse zu verändern. Für diejenigen, die dennoch andere Dimensionen in Betracht ziehen, wird hinsichtlich Schallabsorption und thermischem Wirkungsgrad auf Bild 11 verwiesen.

Eine praktische Herausforderung mag unter Umständen die Bautiefe des porösen Absorberstreifens sein. Wie erläutert, sind aus akustischer Sicht $L_2 = 50$ mm Streifenbreite ideal. Dies kann aber mit statischen und betontechnologischen Anforderungen an Betondecken kollidieren. Für den Fall, dass dünnere Streifen eingebaut werden müssen, wurde das Schallabsorptionsspektrum (<u>Bild 31</u>) für Streifen aus porösem Glasschaum berechnet. Es kann für die Planung verwendet werden.



Sofern für andere, hier nicht untersuchte, Schallabsorber im Streifenansatz der Schallabsorptionsgrad berechnet werden soll, wird auf Gleichung (8) mit den Eingangsdaten aus Gleichung (5) verwiesen. Sie können leicht in jeweils vorhandenen mathematischen Programmierumgebungen wie z.B. Mathematica[®] aber auch in Excel umgesetzt werden.

Die Berechnung des thermischen Wirkungsgrades wäre nicht so trivial, weil hierfür eine FEM-Software notwendig ist. Deshalb wurde ein einfaches analytisches Verfahren entwickelt, dass für homogene, streifenförmige, thermische Isolatoren in einem Betonbauteil validiert wurde. Es beruht auf der Annahme, dass Wärmeströme über Beton- und Absorberstreifen parallel verlaufen. Der Ausgleich der Wärmeströme findet wegen dem großen Unterschied der Wärmeleitfähigkeit von Beton und porösem Absorber in der homogenen Betonschicht hinter den Absorberstreifen statt. Dann können die Wärmeströme im inhomogenen Streifenbauteil mittels eines Netzwerks aus Widerständen und Kondensatoren beschrieben werden. In <u>A-Bild 34</u> ist beispielhaft ein Netzwerk gezeigt; detailliert ist es samt Ergebnissen und Vergleich zu FEM-Berechnungen in [11] beschrieben.

8.3 Fazit

Als guter akustischer, thermischer und gestalterischer Kompromiss eignen sich poröse Absorberstreifen, die jeweils 50 mm breit und tief sind. Sie können mit einem dünnen, akustisch durchlässigen Putz verdeckt werden.

9 Zusammenfassung

Es galt ein schallabsorbierendes System für thermisch aktive Betonbauteile zu beschreiben, zu entwickeln und prototypisch zu testen. Das System soll die gestellten akustischen und thermischen Anforderungen und gleichermaßen wichtig die Anforderung der Gestalter an ebene, glatte Bauteile erfüllen.

Als geeignetes Wirkprinzip wurde der Absorberstreifenansatz gewählt. Absorberstreifen eingebettet in schallharter Umgebung erzeugen ein Streufeld. So ist die Schallabsorption bei geringem Flächeneinsatz deutlich höher, als das Flächenmittel erwarten lässt. Hierfür wurde ein theoretisches Modell zur Prognose des Schallabsorptionsgrades erarbeitet. Dieser Ansatz wurde mit Absorberstreifen aus porösem Glasschaum, faserigem Vlies und Plexiglas- sowie Metall-MPA experimentell getestet. In einer Installation in situ wurde er erfolgreich validiert. Die Berechnung des thermischen Wirkungsgrades wurde mittels einer FEM-Software durchgeführt. Die Ergebnisse wurden experimentell im Labor validiert. Zur Vereinfachung wurde ein Verfahren entwickelt, dass den thermischen Wirkungsgrad für die wesentlichen Aufbauten berechnen kann, ohne FEM-Methoden einzusetzen.

Es wurde festgestellt, dass bei gleichem Flächeneinsatz von Schallabsorbern, der Schallabsorptionsgrad und auch der thermische Wirkungsgrad steigen, je schlanker die Absorberstreifen sind. Diese Erkenntnis und unter Berücksichtigung praktischer Randbedingungen des Baus führte zu einer Kombination bestehend aus 50 mm breiten und gleich tiefen Absorberstreifen aus porösem Glasschaum und 200 mm Betonstreifen. So entsteht eine 250 mm breite Periode (20% Absorberflächenanteil). Diese Konstruktion erfüllt die gestellten Anforderungen an das Schallabsorptionsspektrum und den thermischen Wirkungsgrad und könnte auch verputzt werden. Konstruktionen aus MPA-Streifen sind thermisch effizienter aber akustisch sind sie nicht so effizient wie die aus porösem Glasschaum.

Der in diesem Vorhaben beschriebene und experimentell validierte Ansatz ist vorhandenen Systemen aus akustisch und thermisch funktionaler Sicht mindestens ebenbürtig in Teilen sogar überlegen. Aus gestalterischer Sicht weist er mit seiner glatten und ebenen Oberfläche einen deutlichen Vorteil auf. Er bedarf zwar einer genauen Vorplanung, aber die Kosten sind durchaus konkurrenzfähig mit denen vorhandener Systeme.

10 Literatur

- [1] Koob, C.; Leisering, F.; Lohmüller, S.: Kühldeckenmarkt in Deutschland. cci Fachzeit-schrift für Haus und Gebäudetechnik (12), 2007
- [2] Statistisches Bundesamt: Statistische Jahrbuch 2007 für die Bundesrepublik Deutschland. September 2007
- [3] Leistner, P.; Fuchs, H.V.: Schlitzförmige Schallabsorber. Bauphysik 23 (2001), 333-337
- [4] Lord Rayleigh, "On the Dynamical Theory of Gratings," Proc. R. Soc. London A 79 (532) 399 416 (1907)
- [5] Brillouin L.: Wave Propagation in Periodic Structures, Dover Publications, 1953, 140
- [6] Takahashi D.: Excess Sound Absorption due to Periodically Arranged Absorptive Materials, J. Acoust. Soc. Am. 86 (6), 2215 2222 (1989)
- [7] Drotleff H., Wack R., Leistner P.: Absorption of Periodically Aligned Absorber Strips in Concrete Structures, Proceedings of Internoise, Shanghai, 2008
- [8] Wack R.: Absorbermodell für gesinterten Glasschaum, Diplomarbeit Hochschule für Technik, Stuttgart, 2002
- [9] Maa D.Y.: Potential of microperforated panel absorber, J. Acoust. Soc. Am. 104 (5), 2861 – 2866 (1998)
- [10] http://www.inhaus-zentrum.de/site_de/index.php?node_id=2216
- [11] Ziegler, Matthias: Streifenförmige Schallabsorberanordnungen in betonkernaktivierten Bauteilen: Akustische und thermische Wirksamkeit. Diplomarbeit Fachhochschule Stuttgart – Hochschule für Technik (2009)
- [12] DIN 10077-2 Oktober 2003: Wärmetechnisches Verhalten von Fenstern, Türen und Abschlüssen – Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten – Teil 2: Numerisches Verfahren für Rahmen

11 Anhang

A-Bild 1

Berechneter Schallabsorptionsgrad für senkrechten Schalleinfall in Abhängigkeit der Anzahl der Gleichungen N in (5).

 $\begin{array}{l} L_1=\!0.8\mbox{ m}\ ,\\ L_2=0.2\mbox{ m}\ ,\\ \Lambda_x=\!1.0\mbox{ m}\ ,\\ a_1=0,\ a_2=1\ \lambda_0\ Wellenlänge\ einfallende\ Welle. \end{array}$

A-Bild 2 Berechneter winkelabhängiger Schallabsorptionsgrad nach Gleichungen (5).

 $\begin{array}{l} L_{1}=\!0.8\;m\;,\\ L_{2}=0.2\;m,\\ \Lambda_{x}=\!1.0\;m,\\ a_{1}=0,\;a_{2}=1 \end{array}$

 $2\pi(\Lambda_x/\lambda_0) = 16$





A-Bild 3 Geometrische Grundlage für die thermischen Simulationen. Die Absorberstreifentiefeund breite ist variabel.



A-Bild 4 Zeitliche und örtliche Temperaturverteilung an der Oberfläche einer ungestörten Betondecke.



A-Bild 5 Zeitliche und örtliche Temperaturverteilung an der Oberfläche der Betondecke. Diese ist mit Metall-MPA Absorberstreifen versehen: $L_1 = 200 \text{ mm}$ $L_2 = 50 \text{ mm}$ $\Lambda_x = 250 \text{ mm}$

Absorberflächenanteil 20%



A-Bild 6 Prototyp bestehend aus Faservliesstreifen und Holz $L_2 = 50 \text{ mm}$ $\Lambda_x = 250 \text{ mm}$





A-Bild 7 Prototyp bestehend aus Faservliesstreifen und Holz $L_2 = 400 \text{ mm}$ $\Lambda_x = 1000 \text{ mm}$

A-Bild 8 Prototyp bestehend aus Faservliesstreifen und Holz $L_2 = 100 \text{ mm}$ $\Lambda_x = 300 \text{ mm}$







A-Bild 10 Prototyp bestehend aus transparenten mikroperforierten Streifen und Holz $L_2 = 300 \text{ mm}$ $\Lambda_x = 800 \text{ mm}$



A-Bild 11 Installierte Absorberstreifen aus porosiertem Glas in thermisch aktiver Betondecke.



A-Bild 12 Verputzte Betondecke mit installierten Absorberstreifen aus porosiertem Glas.



A-Bild 13 Metall-MPA installiert in einem Impedanzrohr. Das Messergebnis ist in Bild 15 gezeigt.



A-Bild 14 Metall-MPA bestehend aus drei Streifen installiert in einem Impedanzrohr. Das Messergebnis ist in Bild 16 gezeigt.



A-Bild 15 Ein Streifen Metall-MPA und ein Streifen Holz im Impedanzrohr. Das Messergebnis ist in Bild 17 gezeigt.







A-Bild 17 Eine Probe bestehend aus porösen Glasschaum- und Holzbalkenstreifen im Impedanzrohr. Das Messergebnis ist in Bild 19 gezeigt.



A-Bild 18 Eine Probe bestehend aus porösen Faservlies- und Holzbalkenstreifen im Impedanzrohr. Das Messergebnis ist in Bild 20 gezeigt.



A-Bild 19 Ausschnitt einer Probe bestehend aus porösen Glasschaumstreifen und Holzbalkenstreifen im Hallraum. $L_2 = 50$ mm, $\Lambda_x = 250$ mm Das Messergebnis ist in Bild 22 gezeigt.



A-Bild 20 Probe bestehend aus porösen Glasschaumstreifen und Holzbalkenstreifen im Hallraum. $L_2 = 50$ mm, $\Lambda_x = 150$ mm Das Messergebnis ist in Bild 23 gezeigt.



A-Bild 21 Probe bestehend aus mikroperforierten Absorberstreifen und Holzbalkenstreifen im Hallraum. $L_2 = 300$ mm, $\Lambda_x = 800$ mm Das Messergebnis ist in Bild 24 gezeigt.



A-Bild 22 Skizze des Prüfkörpers P1 mit einem Absorberflächenanteil von 40%.





A-Bild 25 Foto der thermischen Messpositionen auf der Warmseite (oben) und auf der Kaltseite. (unten).



A-Bild 26 Gemessene Lufttemperaturen in den beiden Kammern des Klimasimulators während der Messung P1.



A-Bild 27 Betonstreifen: Vergleich der experimentell und rechnerisch bestimmten Temperaturen in P1. Messpositionen nach A-Bild 24



A-Bild 28 Absorberstreifen: Vergleich der experimentell und rechnerisch bestimmten Temperaturen in P1. Messpositionen nach A-Bild 24



A-Bild 29 Berechnete und gemessene Oberflächentemperaturen an einem Beton- und einem Absorberstreifen der Probe P2.



A-Bild 30 Berechnete und gemessene Wärmeströme an der Oberfläche eines Beton- und eines Absorberstreifens der Probe P2.





A-Bild 31 Berechnete Isothermen bei 50 mm breiten Absorberstreifen (oben) und 100 mm breiten (unten). Die Absorbertiefe beträgt 50 mm.







A-Bild 33 Berechnete Isothermen bei 50 mm breiten MPA-Streifen (oben) und 100 mm breiten (unten). Die Absorbertiefe beträgt 50 mm.





A-Bild 34 Schaltbild des RC-Netzwerks. Details siehe in [11].

