



F. Zickmantel

Vorteile modularer Akustiksysteme im Zusammenspiel mit modernen Bautrends

1 Moderne Bauweisen

Planer und Architekten, welche sich der Entwicklung funktionaler und designorientierter Architekturen von Büro- und Verwaltungsgebäuden widmen, stehen in Zeiten hoher Energie- und Mietpreise zunehmend unter dem Zwang kostenoptimierten Bautrends Folge zu leisten. Dies hat in den letzten Jahren dazu



Bild 1: Typischer Neubau – Sichtbeton, Glas und Parkettboden.

geführt, dass sich Rohbauhöhen einzelner Gebäudeetagen schrittweise verringern. Nicht selten werden auch in öffentlichen Gebäuden Rohbauhöhen von lediglich 2,70 m erreicht. Die gestiegenen Energiekosten erfordern überdies eine Nutzung der Baumasse als thermisch aktives System. Dabei werden zumeist Kunststoffrohre in Betondecken eingelassen, durch welche entweder Warm- oder Kaltwasser fließt. Die Betonkerne können dann die von Mensch und Außenklima entstehenden Temperaturschwankungen aufnehmen und über den Tag ausgleichen. So kann sich die Baumasse bspw. nachts abkühlen und am Tag zur Kühlung der Arbeitbereiche beitragen. Einen weiteren akustischen Problemfall stellen großflächige Glasfassaden dar, welche zunächst helle und freundliche Räume erschaffen, jedoch ebenso wie Betonflächen zu starken Raumreflexionen führen. Schallharte Parkettböden erhöhen zudem den Trittschall, welcher aufgrund von langen Nachhallzeiten verstärkt wahrgenommen wird. Raumakustische Belange geraten vorerst in den Hinter-

grund. Erst nach dem Einzug des Mieters werden oftmals Unzulänglichkeiten durch Lärmbelastungen und schlechte Sprachverständlichkeit aufgedeckt. Gerade höhere Personalbelegungsdichten, die Ausbildung von Großraumstrukturen und der gestiegene Kommunikationsbedarf unserer Gesellschaft machen Raumakustik zu einem wichtigen Thema. Oftmals stellen sich jedoch raumakustische Bedingungen gerade umso schlechter dar, je hochwertiger der technische Gebäudestandard ausgeführt ist. Bei der Erstbesichtigung und der Entscheidung über die Anmietung der Flächen steht beim Mieter jedoch zunächst die Attraktivität des Arbeitsumfeldes im Vordergrund.

Bild 1 stellt einen Besprechungsraum eines typischen Neubaus dar. Ein mittelständiges Unternehmen, welches Service- Dienstleistungen im IT- Bereich anbietet, hatte sich für die Anmietung der attraktiven und hochwertigen Büroflächen entschieden. Aufgrund der raumakustischen Gegebenheiten war die Nutzung des Großraums, sowie der Einzel- und Besprechungsräume für telekommunikative Zwecke jedoch unbrauchbar. Die Bauherrn oder Vermieter nach bereits erfolgter Anmietung für die mangelhafte Raumakustik in Haftung zu nehmen, erwies sich als schwierig. Der Nutzer muss nunmehr auf einen langwierigen Gerichtsprozess hoffen, oder die Kosten für die raumakustische Sanierung selbst übernehmen. Die geltenden normativen Verordnungen sehen zwar Grenzwerte bzgl. der Nachhallzeiten und Pegelminderungen vor, jedoch schreiben die gesetzlichen Regelungen nicht vor, ob der Bauherr, Vermieter oder Nutzer für die Kosten der raumakustischen Sanierung aufkommen muss.

2 Anwendungen von Ruhemodulen

Schallharte Oberflächen reflektieren Schall zurück in den Raum. Wie Bild 2 aufzeigt, kann die bspw. mittels Kommunikationsschall in den Raum eingebrachte Schallenergie bei unzureichender Bedämpfung der Raumbegrenzungsflächen nicht schnell genug reduziert werden. Dies führt infolge zu einer Erhöhung

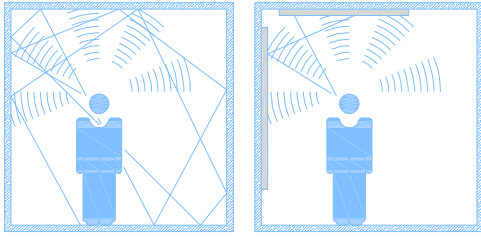


Bild 2: Vermeidung von Raumreflexionen mittels Schallabsorbieren an Raumbegrenzungsflächen.

des Grundgeräuschpegels und zu schlechter Sprachverständlichkeit. Die Reduktion von Raumreflexionen wird bisher konventionell über abgehängte Akustikdecken gelöst. Je nach Raumnutzung reicht dies jedoch, aufgrund der seit 2004 gestiegenen Anforderungen an die notwendigen Schallabsorptionsflächen, nach [1] nicht mehr aus. Hinzukommt, dass Akustikdecken als Wärmeisolator fungieren und demnach nicht in Gebäuden mit betonkernaktiven Decken eingesetzt werden können. In diesem Fall ist die Berücksichtigung von Wandflächen bei der Raumakustikplanung von Vorteil. Zunächst kann man sich die physikalischen Eigenschaften des Raumschallfeldes nutzbar machen. Die Schallenergieverteilung und Beeinflussbarkeit des Schallfeldes hängt demnach sowohl von den verwendeten Schallabsorbermodulen, von deren Positionierung im Raum, sowie von deren Anordnung zueinander ab. Unter Anwendung und Umsetzung dieser Zusammenhänge können die Absorptionsflächen bei gleichen Schallabsorberrmengen deutlich erhöht werden. Dies ermöglicht zunächst die Reduktion des Installations- und Kostenaufwandes. Aufgrund des geringeren Flächenbedarfs an Schallabsorbieren im Decken- und/ oder Wandbereich kann zudem die thermische Regulierung bauteilaktiver Systeme gewährleistet werden.

2.1 Positionierungen von Ruhemodulen im Raum

In [2] wird die Wirkungsweise von Ruhemodulen dokumentiert. Schallabsorber, wie in etwa Helmholtzresonatoren oder Plattenschwinger, welche auf Druckschwankungen reagieren, können Schall im Bereich dessen größter Druckamplitudenschwankung besonders effektiv absorbieren. Die nach [3] gemessenen Schallabsorptionsflächen lassen sich zunächst durch die Anordnung der Akustikmodule zu den Raumbegrenzungskanten hin optimieren. Dies resultiert aus der Überlagerung verschiedener Frequenzen, welche an den Raumkan-

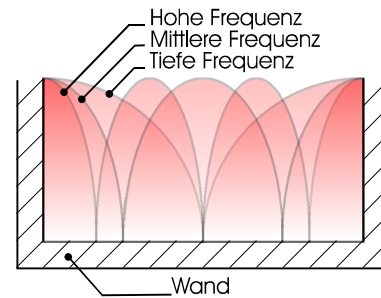


Bild 3: Darstellung des Schalldruckbetrages zwischen zwei parallelen Wänden bei Überlagerung der drei niedrigsten Modenfrequenzen.

ten jeweils ein Maximum ihres Schalldruckes aufweisen. Bild 3 verdeutlicht diesen Zusammenhang anhand einer zweidimensionalen Darstellung des Schalldruckbetrages für drei unterschiedliche Frequenzen zwischen zwei parallelen Wänden. Während sich die Amplituden der Schalldrücke im freien Raum nur selten in ihren Maxima überlagern, ist dies in Nähe des Wandbereichs generell der Fall. Aufgrund des Wandwiderstandes an den Begrenzungsflächen baut sich der Schalldruck stärker als im freien Raum auf. Wie weit sich diese Erhöhungen von den Begrenzungsflächen entfernen hängt von der jeweiligen zu betrachtenden Frequenz ab. Tiefe Frequenzen verfügen aufgrund ihrer langen Wellenlängen und dem damit verbundenen langsamen Funktionsabfall auch in einem relativ großen Abstand zur Wand noch über hohe Schalldrücke. Hingegen sind bei den kurzwelligen hohen Frequenzen bereits in geringen Abständen zu den Raumbegrenzungskanten starke Druckabfälle zu verzeichnen. Generell fallen die Schalldrücke aller Frequenzen von der Wand ausgehend zunächst nur langsam ab. Dies ist der Kosinusfunktion geschuldet, da bis zu einem Abstand von $\pi/4$ bzw. $\lambda/8$ zur Wand

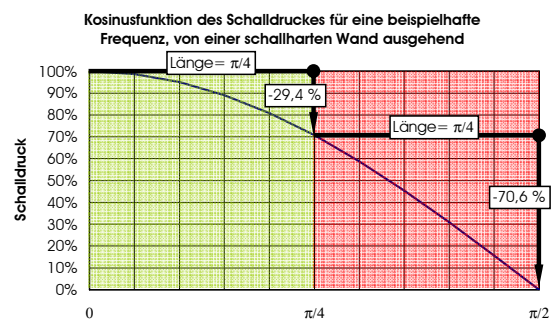


Bild 4: Verlauf des Schalldruckes für Frequenzen von einer schallharten Wand ausgehend.

der Schalldruck auf lediglich ca. 70 % des Maximums abfällt. Aufgrund des zunehmenden negativen Anstieges bis $\pi/2$ bzw. $\lambda/4$ sinkt der Schalldruck, trotz der wie zuvor gleichen Lauflänge von $\pi/4$, auf 0 % ab. In Bild 4 wird der Funktionsverlauf des Schalldruckes, von einer schallharten Wand ausgehend, verdeutlicht. Mittels dieser Betrachtungsweise kann man die Schalldruckfunktion nunmehr im Bezug zur Frequenz ermitteln und erhält daraus die folgenden Formeln:

$$l_{L_p(70)} = \frac{c}{8 \cdot f} \quad (1)$$

und

$$l_{L_p(0)} = \frac{c}{4 \cdot f} \quad (2)$$

Dabei entspricht „c“ der Schallgeschwindigkeit und „f“ der jeweiligen Frequenz. Die Berechnung von l_{L_p} nach den Formeln (1) und (2) ermöglicht somit die Bestimmung des Abstandes zur schallharten Wand bei welchem der Schalldruck einer Frequenz bei 70 % bzw. bei 0 % liegt. Eine tiefe Frequenz von 100 Hz verfügt demnach in einem Abstand von 43 cm zur Wand über einen Schalldruck von 70 % gegenüber dessen Maximum direkt an der Wand. Ein Schalldruck von 0 % gegenüber dem Maximalwert wird in einem Abstand von 86 cm zur Wand erreicht. Bei einer hohen Frequenz von bspw. 1 kHz wird hingegen ein

Schalldruck von 70 % in einem Abstand zur Wand von lediglich 4,3 cm bzw. entsprechend 8,6 cm für einen Schalldruck von 0 % ermittelt.

In Bild 5 wurde eine Berechnung der Schalldruckpegelverteilung für einen beispielhaften Rechteckraum der Abmessungen L-B-H: 5 m x 4 m x 3 m bei dezentraler Quellenregung über drei ausgewählte Frequenzbereiche ermittelt. Wie die Grafiken aufzeigen, ergibt sich bei allen drei Frequenzbereichen eine Erhöhung zu den Raumkanten und insbesondere in den Raumecken. Die Schalldruckpegelerhöhungen des tiefen Frequenzbereiches zwischen 20 bis 200 Hz ragen aufgrund der bereits beschriebenen Zusammenhänge nach Bild 4 weit von den Begrenzungsflächen in den Raum hinein. In den Frequenzbereichen zwischen 200 bis 600 Hz bzw. 1 kHz bis 2 kHz verbleiben die Schallpegelmaxima hingegen in Nähe der Kantenbereiche.

Die Schalldruckmaxima sind zudem besonders bei Frequenzen ausgeprägt, welche in einer halben Wellenlänge oder deren ganzzahligen Vielfachen dieser in die Raumdimension zweier sich parallel gegenüberliegender Begrenzungsflächen einpassen lassen. Man spricht dann von sog. Raummoden oder stehenden Wellen, da die Reflexionswelle zwischen den beiden Wänden wieder exakt auf demselben Weg, der einfallende Welle erfolgt – nur in umgekehrter Richtung. Die entsprechenden Frequenzen lassen sich für einen Rechteckraum der Dimensionen l_x, l_y bzw. l_x nach Formel (3) ermitteln [3], wobei l_x der größten Raumdimension und l_z der kleinsten entspricht:

$$f_{n_x, n_y, n_z} = \frac{c}{2} \cdot \sqrt{\left(\frac{n_x}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{l_z}\right)^2} \quad (3)$$

$$n = 0, 1, 2, 3, \dots$$

Die niedrigste Raummode $n_x; n_y; n_z = 1; 0; 0$ wird am Beispiel des Rechteckraumes mit den Abmessungen L-B-H: 5 m x 4 m x 3 m wie folgt ermittelt:

$$f_{1,0,0} = \frac{343}{2} \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{5}\right)^2} \quad (4)$$

Da die Koeffizienten n_y und n_z in diesem Fall nicht berücksichtigt werden, vereinfacht sich

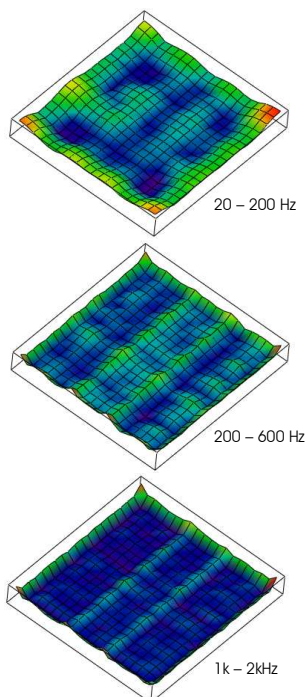


Bild 5: Verteilung der Schallenergie im Raum für verschiedene Frequenzbereiche.

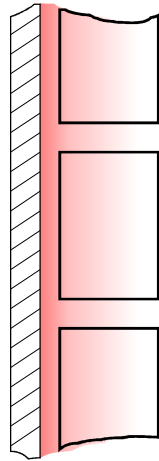


Bild 6: Positionierung von Schallabsorbern in Nähe der Raumkanten Darstellung der Schallpegelverteilung (roter Bereich).

die Formel entsprechend. Raummoden, welche nur eine Richtungsausbreitung aufweisen, werden als Axialmoden bezeichnet (Beispiele: 3;0;0, 0;4;0, oder 0;0;2). Raummoden mit zwei Termen, also Ausbreitungsrichtungen in gleichzeitig zwei Dimensionen werden hingegen als Tangentialmoden bezeichnet (Beispiele: 1;2;0, 0,3,2, oder 2,0,4). Bei einer dreidimensionalen Raummode handelt es sich um sog. Obliquemoden (Beispiele: 1;1;1, 2;3;1, oder 3;4;2). Die niedrigste stehende Welle ist demnach stets als Axialmode ausgeprägt und wird am Beispiel nach Formel (4) mit 34,3 Hz ermittelt. Zusammenfassend zeigt [Bild 6](#) eine optimale Positionierung von Schallabsorbermodulen in den Raumkanten auf.

Eine pauschale Aussage über die prozentuale Veränderung der Schallabsorptionsfläche bei

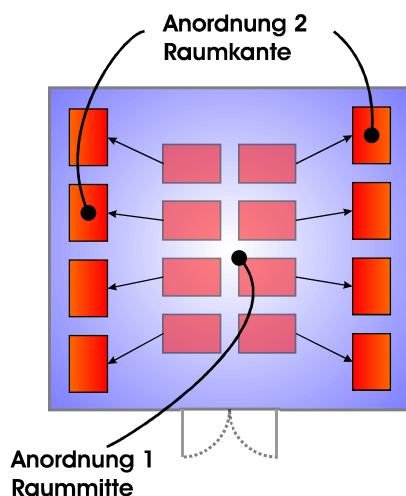


Bild 7: Darstellung eines Versuchsaufbaus zur Messung der äquivalenten Schallabsorptionsfläche bei Anordnung von Schallabsorbermodulen in der Raummitte und in der Raumkante.

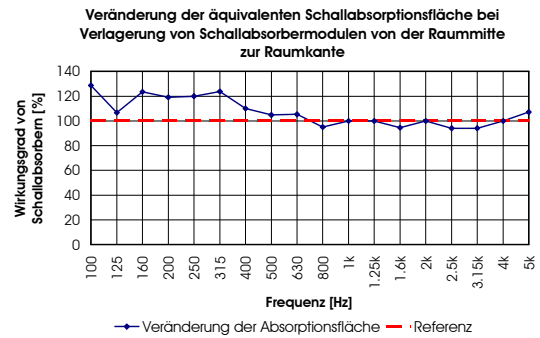


Bild 8: Veränderung der äquivalenten Schallabsorptionsfläche bei Verlagerung von Schallabsorbern in die Kantenbereiche.

Verlagerung von Ruhemodulen von einer raummittigen Anordnung hin zur Raumkante lässt sich zumeist nicht erbringen. Diese ist von der Raumgröße und Geometrie, der bereits vor Installation von Akustikmodulen vorhandenen äquivalenten Schallabsorptionsfläche und vom verwendeten Schallabsorber abhängig. Die Veränderung der Schallabsorptionsfläche bei unterschiedlicher Positionierung von Ruhemodulen wurde in einem Hallraum mit den Abmessungen von ca. L-B-H: 8 m x 7,5 m x 6,5 m untersucht. In [Bild 7](#) werden beide Messanordnungen der 8 Stück und jeweils 1,5 m x 1 m x 0,1 m großen Absorbermodule aufgezeigt. Die Schallabsorptionsflächen führen zu einer Veränderung im Frequenzbereich zwischen 100 Hz bis 630 Hz. Gemäß [Bild 8](#) kann in diesem Fall eine Erhöhung der Absorptionsfläche um bis zu 20 % im Bereich zwischen 160 Hz und 315 Hz erreicht werden.

2.2 Positionierungen von Ruhemodulen zueinander

Einzelne Moleküle in einem Luftschallfeld sind voneinander abhängig. Andernfalls würde eine Schallübertragung nicht stattfinden können. Schallwellen sind als sog. Longitudinalwellen ausgeprägt. Dabei findet die Teilchenbewegung in Richtung der Ausbreitung der Welle statt. [Bild 9](#) stellt diesen Zusammenhang im Vergleich zu einer Transversalwelle dar, welche z.B. bei der Ausbreitung im Wasser auftritt. Hierbei sind Teilchenbewegung und Wellenausbreitungsrichtung um 90° versetzt. Diese Wellenform ist geläufiger, da sie vom Betrachter z.B. am Strand mit Blick auf das Meer direkt beobachtet werden kann. Auf offenem Meer entstehen hohe Wellenberge und -täler (Teilchenbewegung), welche sich in Richtung des Festlandes bewegen (Wellenausbreitung). Anhand von Transversalwellen

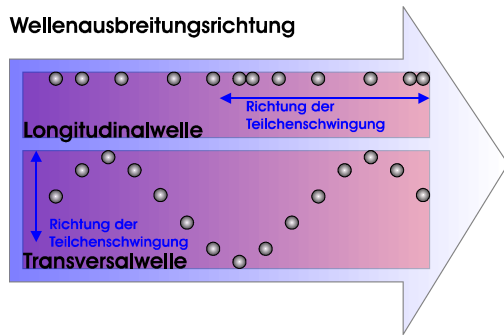


Bild 9: Ausbreitungsrichtung im Bezug zur Teilchenbewegung für zwei Wellentypen.

lässt sich auch erklären, weshalb ein Schallabsorber das Wellenfeld in seiner näheren Umgebung beeinflusst. Man stelle sich vor, ein Schallabsorber übt auf das Luftschallfeld eine ähnliche Wirkung, wie ein Wellenbrecher z.B. ein Holzpflock im Wasser aus. Durch den Aufprall der Wellen an diesem Hindernis entstehen auch Verwirbelungen im Umfeld des Wellenbrechers welche die Ausbreitung der Ausgangswelle vermindern. Zunächst kann nur eine sehr geringe Wellenausbreitung im Wellenbrecher selbst stattfinden. In diesem Fall müssen die Wasserwellen (Transversalwellen) bspw. in Biegewellen gewandelt werden, welche sich in Festkörpern ausbreiten. Derartige Impedanzübergänge führen zu hohen Absorptionseigenschaften. Bild 10 stellt die erläuterten Zusammenhänge dar. Man könnte sich demnach vorstellen, dass die Fläche des Holzpflockes derer eines Schallabsorbers entspricht. Die Intensität der vom Wellenbrecher zurückgeworfenen Wellen nimmt mit zunehmender Entfernung ab. Entsprechend wird auch die Ausgangswelle mit zunehmender Entfernung vom Wellenbrecher immer geringer beeinflusst. Wie intensiv der Einfluss des Schallabsorbers auf die Ausgangswelle ist, hängt letztlich von dessen Impedanz und Kantenwirkung ab. Daraus abgeleitet kann man

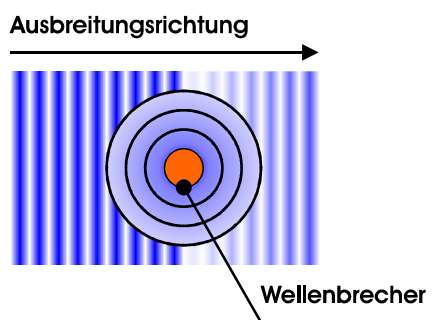


Bild 10: Schematische Darstellung der Beeinflussung des Wellenfeldes mittels eines Wellenbrechers.

bereits bei einer geringen Anzahl an Modulen eine akustische Wirksamkeit erzielen, welche einer vollflächigen Akustikdecke entspricht.

Bei der Raumakustikplanung mittels Akustikmodulen können generell drei Installationsvarianten unterschieden werden. Bild 11 zeigt diese Möglichkeiten auf. Schwarz gestreifte Flächen stellen jeweils die tatsächliche Absorberkonstruktion dar. Um die Module verlaufende grüne Bereiche kennzeichnen den vom Schallabsorber beeinflussten Bereich, welcher mit zunehmender Entfernung vom Modul ab-

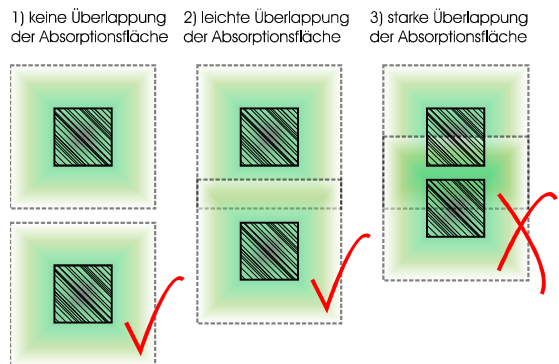


Bild 11: Optimale Abstände zwischen Schallabsorbermodulen.

nimmt (weiße Darstellung). Bei einem sehr großen Abstand der Module zueinander funktioniert jeder Schallabsorber lokal. Die Schallabsorptionsflächen überlappen demnach nicht, so dass jeder Schallabsorber die maximale Schallabsorption erzielen kann. Im zweiten Fall überlappen die Absorptionsflächen leicht. Eine optimale Wirkung ist gewährleistet, wenn die Schallabsorption der sich überlappenden Bereiche $\leq 100\%$ beträgt. Vereinfacht ausgedrückt kann eine Fläche, welche Schall zu 60% absorbiert noch mit einer Fläche überlagert werden, welche eine Schallabsorption von 40% aufweist. In der dritten Teilgrafik von Bild 11 ist dies nicht der Fall. Die Akustikmodule sind so dicht zu einander angeordnet, dass ein Teil des Überlappungsbereiches beider Absorptionsflächen in der Addition einen Wert $>100\%$ ergibt. Da die Schallenergie in den einzelnen Raumbereichen nur zu maximal 100% reduziert werden kann, ergibt sich bei einer Überlagerung von bspw. zwei Absorptionsflächen mit einer Schallabsorption von jeweils 60% ein Verlust von insgesamt 20% bzw. 10% pro Modul. In der Praxis führt dies zur Reduktion des Schallabsorptionsgrades jedes Einzelmoduls. Eine starke Überlappung von Absorptionsflächen ähnelt daher der Wirkungsweise von Akustikdecken.

3 Ruhemodul Office im Vergleich zu konventionellen Akustiksystemen

In Betrachtung der bisherigen Erkenntnisse ist die Installation modularer Raumakustiksysteme gegenüber ganzflächigen von Vorteil. Durch den geringeren Bedarf an Schallabsorbern können Kosten gespart werden. Zudem sind Montagearbeiten oftmals preisgünstiger und unaufwendiger, als bspw. bei geschlossenen Rasterdecken. Bild 12 stellt den Schallabsorp-

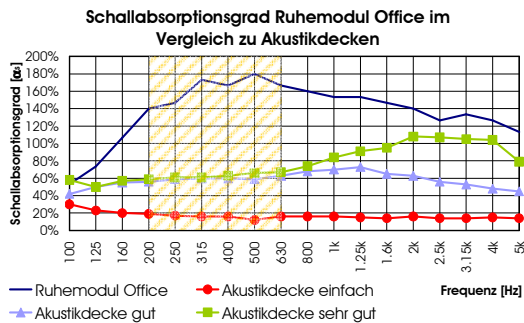


Bild 12: Schallabsorptionsgrad des Ruhemodul Office mit einer Bautiefe von 10 cm im Vergleich zu drei verschiedenen Akustikdecken mit einer Abhangtiefe von 20 cm.

tionsgrad des Ruhemodul Office mit einer Bautiefe von 10 cm typischen Akustikdecken mit Abhanghöhen von 20 cm gegenüber. Die Ruhemodule wurden dabei gleichmäßig auf dem Boden eines Hallraumes verteilt und jeweils in einem Abstand von einem Meter zu einander positioniert. Da bei kantenwirksamen Modulen typischer Weise die äquivalente Schallabsorptionsfläche A angegeben wird, muss für einen Vergleich gemäß Formel (5) zunächst der Schallabsorptionsgrad α bestimmt werden, welcher im Bezug zur Oberfläche S des jeweiligen Schallabsorbers steht.

$$\alpha = \frac{A}{S} \quad (5)$$

Im Frequenzbereich der größten Lautheitsempfindung zwischen 200 bis 600 Hz ermöglicht das Ruhemodul Office aufgrund der punktuellen Rauminstallation gegenüber den in Bild 12 dargestellten beispielhaften Akustikdecken trotz lediglich halber Einbautiefe deutlich höhere Absorptionskoeffizienten. Es wird demnach eine um bis zu 100 Prozentpunkte höhere Schallabsorption erzielt bzw. der Wirkungsgrad mehr als verdreifacht. Die Schallabsorptionseigenschaften einer sehr guten Akustikdecke bilden dabei die Funktionsweise eines typisch porösen Schallabsorbers ab. Demnach steigt die Schallabsorption mit zu-

nehmender Frequenz an. Im Frequenzbereich zwischen 2 kHz und 4 kHz erreicht diese, Koeffizienten von 100 %. Nach [2] wird jedoch dieses Frequenzband unter Berücksichtigung menschlicher Sprache als Schallquelle weniger intensiv wahrgenommen. Zudem verfügen schallharte Räume selten über lange Nachhallzeiten im hochfrequenten Frequenzbereich, da die relativ kurzen Wellenlängen bereits der Luftabsorption unterliegen. Dies verdeutlicht Bild 13, wobei der in Bild 1 erwähnte

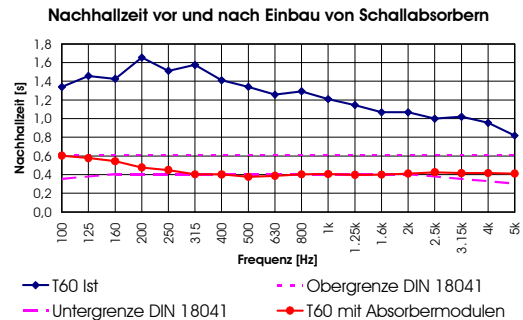


Bild 13: Nachhallzeit vor und nach Installation von Schallabsorbern in einem Besprechungsraum

Besprechungsraum messtechnisch untersucht wurde. Zunächst verläuft die gemessene Ist-Nachhallzeit ($T60$ Ist) im Frequenzbereich der größten Lautheitswahrnehmung zwischen 1,6 und 1,2 Sekunden. Daraus resultiert eine äquivalente Schallabsorptionsfläche von ca. 12 bis 15 m^2 . Nach [1] beträgt die Sollnachhallzeit für den 130 m^3 großen Raum 0,51 Sekunden. Nach Einbau von lediglich acht Deckenmodulen und vier Vorwandabsorbern des Typs Ruhemodul Office kann die Nachhallzeit gemäß Bild 13 in den Sollbereich abgesenkt werden. Dabei beträgt die Gesamtoberfläche an Schallabsorbern $S=23,2$ m^2 . Deren äquivalente Schallabsorptionsfläche ergibt sich letztlich aufgrund der in Kapitel 2 erwähnten physikalischen Phänomene zu 35 bis 40 m^2 . Bei Montage der insgesamt 12 Ruhemodule werden somit lediglich ca. 26 % der Deckenfläche und 14 % der Wandflächen belegt.

4 Literatur

- [1] DIN 18041: Hörsamkeit in kleinen bis mittelgroßen Räumen. (2004)
- [2] Zickmantel, F: Abstract 0408 - Wirkungsweise und ökonomisches Verhalten des Ruhemoduls im Bürobereich. SilenceSolutions GmbH (2008)
- [3] Müller G, Möser M: Taschenbuch der Technischen Akustik. Springer-Verlag Berlin Heidelberg (2004)