



EINFLUSS DES BODENBELAGS AUF DEN AKUSTISCHEN KOMFORT

von KP Acoustics

WHITEPAPER

modulyss®

WHITEPAPER

INHALT

DIE AUTOREN	3
WARUM IST AKUSTIK SO ENTSCHEIDEND?	4
AKUSTISCHER KOMFORT	4
AKUSTIK IN INNENRÄUMEN	5
BODENBELÄGE UND AKUSTIK	9
DESIGNASPEKTE FÜR UNTERSCHIEDLICHE RAUMTYPEN	12
AKUSTIKBÖDEN: INNOVATIONEN UND ZUKUNFTSTRENDS	16
BIOPHILE DESIGNS UND BODENBELÄGE	17
NACHHALTIGKEIT UND AKUSTISCHE BODENLÖSUNGEN	18
PRAKTISCHE EMPFEHLUNGEN UND FALLSTUDIEN	20
FAZIT	23
QUELLENANGABEN	24

DIE AUTOREN

CHRIS BARLOW



Chris Barlow leitet die Abteilung Forschung und Innovation an den KP Acoustics Research Labs im Vereinigten Königreich. Er besitzt einen Master of Science sowie einen Dokortitel der University of York und blickt auf über 25 Jahre Erfahrung in der Audio- und Akustikbranche zurück, sowohl im akademischen als auch im industriellen Umfeld. Vor seiner Rückkehr in die Industrie war Chris Professor für Akustik an der Southampton Solent University. Seit 2021 verantwortet er die FuE-Aktivitäten der KP Acoustics Group und engagiert sich weiterhin intensiv in der Forschung und Lehre auf dem

Gebiet der Akustik.

Sein besonderes Interesse gilt der Schnittstelle zwischen Schallwiedergabe und Raumakustik und vor allem der Frage, wie Menschen bewusst und unbewusst auf Schall reagieren, sei es in Innenräumen oder in Außenbereichen. Chris sitzt im Vorstand des Institute of Acoustics und leitet den dortigen Bildungsausschuss. Im Mai 2023 wurde er für seine besonderen Verdienste um das Institut ausgezeichnet, im Mai 2024 erhielt er die Ehrenmitgliedschaft (Fellowship) des Institute of Acoustics.

JUAN BATTANER-MORO

Juan Battaner-Moro leitet den Bereich Wissenstransfer an den KP Acoustics Research Labs. Er hat einen Lizenzabschluss in Physik sowie einen Master of Science im Fachgebiet Schall- und Schwingungskontrolle. Er ist außerdem Vollmitglied des Institute of Acoustics (MIOA). Seit über 25 Jahren ist er in der akustischen Beratung, Forschung und technischen Ausbildung tätig.



STEVEN LESLIE



Steven Leslie ist Beratungsleiter bei KP Acoustics. Nach seinem Bachelorabschluss in Audio Technology an der University of Salford stieg er in die Akustikbranche ein. Mit über 17 Jahren Berufserfahrung in der Akustikplanung und -beratung war er an einer Vielzahl von Projekten beteiligt, vom Wohn- und Gewerbebau über Büro-, Gesundheits- und Bildungseinrichtungen bis hin zu Infrastruktur- und Mischnutzungsprojekten, sowohl im Neubau als auch in der Sanierung. Sein berufliches Spektrum reicht von Kleinprojekten in fokussierten Teams bis hin zu umfangreichen

interdisziplinären Leuchtturmprojekten.

WARUM IST AKUSTIK SO ENTSCHEIDEND?

Unter den menschlichen Sinnen ist das Gehör als einziger ununterbrochen aktiv und mit einer umfassenden Raumwahrnehmung versehen. Unser Körper reagiert instinktiv auf Schall. Schon ein vergleichsweise niedriger Geräuschpegel kann eine Stressreaktion auslösen – die sogenannte Kampf- oder-Flucht-Reaktion. Dabei werden Stresshormone ausgeschüttet, die eine Reihe physiologischer Effekte nach sich ziehen, darunter eine erhöhte Herzfrequenz, gesteigerter Blutdruck und eine verlangsamte Verdauung.

Es ist wissenschaftlich belegt, dass diese Stressreaktionen auch nach dem Abklingen der Lärmquelle fortauern können. Es besteht ein Zusammenhang mit langfristigen Gesundheitsfolgen, darunter ein erhöhtes Risiko für Herz-Kreislauf-Erkrankungen: Jährlich lassen sich in Europa schätzungsweise 48.000 neue Fälle von Herzerkrankungen auf Lärmbelastung zurückführen. [1]

Der durchschnittliche Erwachsene verbringt 90 % seiner Zeit in Innenräumen – ob am Arbeitsplatz, bei Freizeitaktivitäten oder zu Hause. Dabei ist er einer Vielzahl von Geräuschen ausgesetzt, von haustechnischen Anlagen bis zu selbst oder von anderen Gebäudenutzern verursachtem Lärm. Die akustischen Bedingungen in Innenräumen beeinflussen unsere Fähigkeit zu kommunizieren, uns zu konzentrieren, zu lernen, soziale Beziehungen zu pflegen oder zu schlafen. Die Bauakustik hat somit erheblichen Einfluss auf unsere Lebensqualität – von der Produktivität im Arbeitsumfeld bis hin zur Erholung und Regeneration im privaten Raum.

AKUSTISCHER KOMFORT

Das Konzept der „Umweltqualität in Innenräumen“ (IEQ) umfasst Aspekte der Planung, Analyse und Nutzung gesunder und komfortabler Gebäude. [2] Es berücksichtigt eine Vielzahl psychologischer, sozialer, verhaltensbezogener und kontextueller Faktoren, die ein als „angenehm“ empfundenenes Raumklima ausmachen. [3] Die zentralen Komponenten der IEQ sind thermischer Komfort, visueller Komfort, Raumluftqualität und akustischer Komfort.

Unter akustischem Komfort versteht man den subjektiv empfundenen Zustand von Wohlbefinden und Zufriedenheit mit den akustischen Bedingungen in einem Raum. [4] Das Gebäudedesign hat darauf einen maßgeblichen Einfluss: Schlechte Akustik kann zu erhöhtem Stress, verminderter Lernfähigkeit und Produktivität, körperlichem Unbehagen sowie Beeinträchtigungen der Privatsphäre führen. [5]

Umgekehrt kann ein gutes Akustikdesign die Aufenthaltsqualität steigern. In Schulen etwa lässt sich nachweislich die Lärmbelastung senken und zugleich die Lernleistung und das Schülerverhalten verbessern. Auch in Wohnräumen kann sich dank Trittschalldämmung der wahrgenommene Wohnwert signifikant erhöhen. [6]

AKUSTIK IN INNENRÄUMEN

Schall breitet sich üblicherweise wellenförmig im Raum aus – man spricht von Luftschall. Steht eine Schallquelle jedoch in direktem Kontakt mit der Gebäudestruktur – z. B. ein an der Wand montierter Fernseher oder Vibrationen, die beim Auftreten auf den Boden entstehen –, überträgt sich die Schwingung unmittelbar durch den Baukörper. Dieser so genannte Körperschall wird an anderen Stellen im Gebäude wieder als Luftschall abgestrahlt. [7]

Trifft eine Luftschallwelle auf eine Oberfläche (Wand, Decke, Boden o. dgl.), wird ein Teil ihrer Energie durch Reibung im Material aufgenommen (Schallabsorption), ein weiterer Teil durch die Struktur hindurchgeleitet (Transmission) und der Rest in den Raum zurückgeworfen (Reflexion; vgl. Abbildung 1).

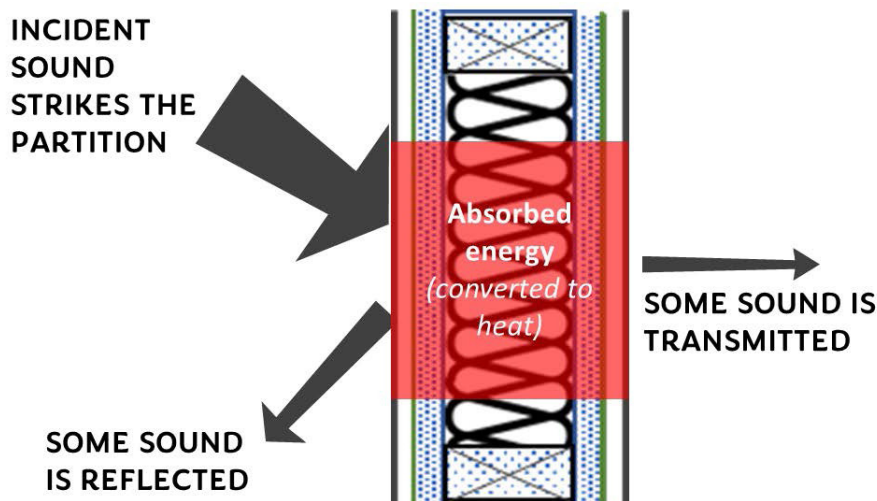


Abbildung 1 – Schallreflexion, -absorption und -transmission

Im Raum selbst breitet sich der Direktschall auf kürzestem Weg von der Quelle zum Hörer aus (Abbildung 2). Da sich Schallwellen jedoch in alle Richtungen bewegen, treffen andere Anteile der Welle zunächst auf angrenzende Flächen, werden dort reflektiert und erreichen das Ohr erst nach einer oder mehreren Reflexionen. Diese sogenannten Frühreflexionen liefern dem menschlichen Gehör Anhaltspunkte zur Größe eines Raumes und zur eigenen Position darin – vergleichbar mit einer Echoortung.

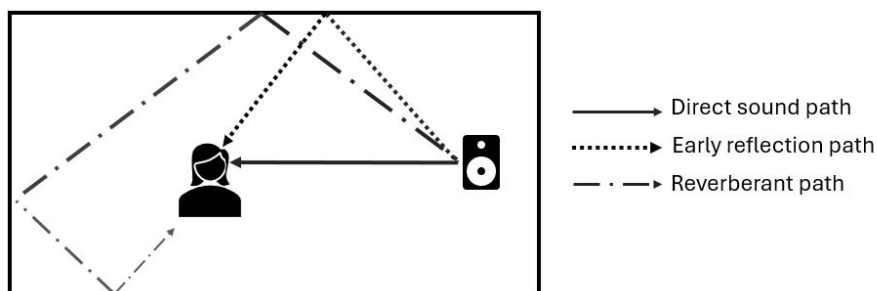


Abbildung 2 – Schallausbreitung in einem geschlossenen Raum

Zwischen Schallquelle und Empfänger kann eine unendliche Anzahl möglicher Reflexionspfade auftreten, sodass der Schall mehrfach reflektiert wird, bis seine Energie vollständig abklingt. Dieser Vorgang kontinuierlicher Reflexion wird als Nachhall bezeichnet.

Die Nachhallzeit beschreibt, wie lange der Schalldruck benötigt, um nach dem Verklingen der Quelle um 60 Dezibel abzufallen – d. h. auf ein Millionstel seines ursprünglichen Pegels (siehe Abbildung 3). Dementsprechend wird sie in der Regel als „RT60“ angegeben.

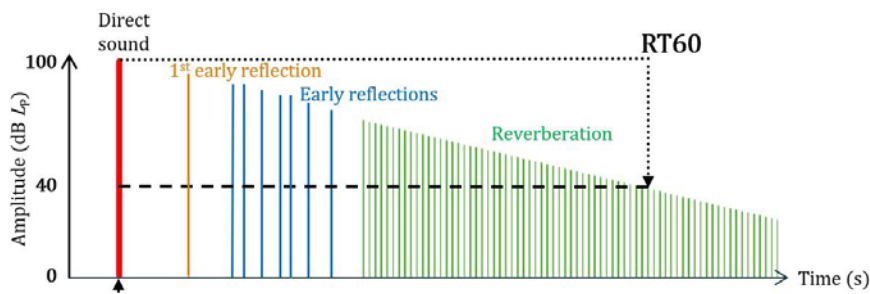


Abbildung 3: Nachhallzeit

Bei einem hohen Anteil schallabsorbierender Oberflächen in einem Raum (u. a. Raumtextilien, Teppiche, Vorhänge) fällt die Nachhallzeit entsprechend kurz aus. Weniger absorbierende Materialien wie Mauerwerk oder harte Bodenbeläge verursachen hingegen eine höhere Nachhallzeit.

Der Schallabsorptionsgrad ist definiert als das Verhältnis, in dem auf eine Fläche auftreffende Schallenergie absorbiert bzw. transmittiert, also nicht in den Raum zurückgeworfen wird. Sein Wert liegt zwischen 0 (keine Absorption) und 1 (keine Reflexion, vollständige Absorption).

$$\alpha = \left(\frac{I_a + I_t}{I_i} \right) \text{ where } I_i = \text{incident energy, } I_a = \text{absorbed energy \& } I_t = \text{transmitted energy}$$

Da die Absorption stark frequenzabhängig ist, werden für gebräuchliche Baumaterialien in der Regel Absorptionsgrade für Terzbänder zwischen 100 und 5.000 Hz angegeben. In der Regel wird das durchschnittliche Absorptionsverhalten von Materialien anhand des „gewichteten“ Absorptionsgrads in Form eines Einzahlwerts angegeben.

Ein ähnlicher, vor allem in den USA und Kanada gebräuchlicher Einzahlwert ist der sogenannte Lärmreduzierungskoeffizient (NRC). Er berechnet sich als arithmetisches Mittel der Absorptionsgrade bei 250 Hz, 500 Hz, 1.000 Hz und 2.000 Hz.

Ein Teil der Schallenergie wird jedoch nicht absorbiert, sondern transmittiert, also durch Bauteiltrennungen hindurchgeleitet.

Dies geschieht, indem die auftreffende Schallwelle die Bauteiloberfläche in Schwingung versetzt. Die Schwingungsenergie wird sodann auf die andere Seite übertragen, wo die Oberfläche wiederum als Schallquelle wirkt und die Schallwelle in den angrenzenden Raum abstrahlt. [8]

Der Transmissionsgrad gibt dabei das Verhältnis der Schallintensität vor und hinter der Grenzfläche an (durchgelassene / einfallende Welle).

$$\tau = \left(\frac{I_r}{I_i} \right) \text{ where } I_i = \text{incident energy, } I_t = \text{transmitted energy}$$

SCHALL IN GESCHLOSSENEN RÄUMEN

Ein häufiges Designelement moderner Gewerbebauten sind offen gehaltene Decken sowie Bodenbeläge aus Beton, Stein, Laminat oder Vinyl.

Besonders häufig anzutreffen ist dies in öffentlichen Bereichen wie Atrien, zunehmend aber auch in anderen Räumen.

Durch die oftmals geringe Schallabsorption erhöht sich dort die Nachhallzeit, was wiederum den Lautstärkepegel aller Geräusche im Raum merklich verstärken kann – etwa das Klappern von Küchengeräten, Fernsehgeräusche, Gespräche oder sonstige Aktivitäten. [7] Dies beeinträchtigt den akustischen Komfort, und tendenziell fühlen sich mehr Menschen durch Lärm anderer Gebäudenutzer gestört.

Ein bewährter Ansatz zur Verkürzung der Nachhallzeit ist der Einsatz von porösen Absorbern. Diese Materialien lassen Schallwellen durch feine Poren oder Spalten in ihre Struktur eindringen. Beim Durchwandern dieser Hohlräume wird die Schallenergie durch Reibung in Wärme umgewandelt und somit absorbiert. Typische poröse Absorber sind Textilien wie Vorhänge oder Teppiche, offenzellige Schaumstoffe sowie gepresste oder verdichtete Fasermaterialien – etwa aus Mineralwolle, Glasfaser, Kunststofffasern oder auch aus Wolle).

SPRACHVERSTÄNDLICHKEIT UND AKUSTISCHE PRIVATSPHÄRE

Sprachverständlichkeit und akustische Privatsphäre zählen zu den zentralen Aspekten der Raumakustik, allen voran in gewerblich genutzten Gebäuden. Sprachverständlichkeit beschreibt den Grad, in dem gesprochene Sprache hörbar und verständlich ist. Hohe Verständlichkeitswerte sind essenziell in Bildungseinrichtungen, Konferenzräumen, Gesundheitseinrichtungen sowie in sicherheitskritischen Bereichen, etwa bei Notfalldurchsagen.

Die akustische Privatsphäre ist das Gegenstück: Sie beschreibt das Maß, in dem das Mithören von Gesprächen verunmöglicht ist. Eine solide Sprachabschirmung ist vor allem in Büroumgebungen unerlässlich, etwa in der Finanz- oder Versicherungsbranche sowie im Gesundheitswesen, wo mit vertraulichen Daten gearbeitet wird. Definitionsgemäß geht hohe Verständlichkeit in einem Raum mit geringer Privatsphäre einher – und umgekehrt.

Ein gängiges Maß zur Bewertung der Sprachverständlichkeit ist der Sprachübertragungsindex (STI). In einem automatisierten Messverfahren wird anhand eines speziellen Prüfsignals mit sprachähnlichen Merkmalen gemessen, wie gut der Informationsgehalt der Sprache in einem Raum übertragen wird. Der derart ermittelte STI-Wert reicht von 0 = „völlig unverständlich“ bis 1 = „perfekte Verständlichkeit“ (siehe Abbildung 4).

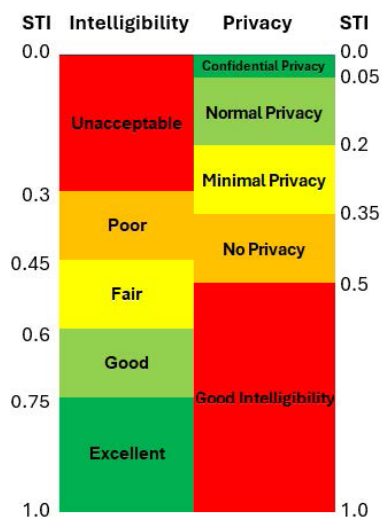


Abbildung 4 – STI-Werte im Spannungsfeld von Sprachverständlichkeit und Privatsphäre

Ein hoher Hintergrundgeräuschpegel überlagert bestimmte Anteile der Sprache und verringert so die Verständlichkeit. Verbessern lässt sich die Verständlichkeit umgekehrt durch verstärkte Schalldämmung (Senkung des Außenlärmpegels) und durch Unterdrückung von im Raum erzeugtem Störlärm (z. B. technische Geräte).

Allerdings kann eine allzu starke Reduktion von Hintergrundgeräuschen etwa in Großraumbüros auch zu vermehrter Ablenkung und Irritation durch Nachbargespräche führen.

Auch eine verlängerte Nachhallzeit wirkt sich negativ auf die Sprachverständlichkeit aus, da Nachhall die „Hörsamkeit“ beeinträchtigt. Durch den Einsatz schallabsorbierender Materialien – etwa Teppiche, Polstermöbel oder Akustikpaneele – wird der Nachhall schneller abgebaut. Dies drosselt den Verstärkereffekt des Raums, reduziert das allgemeine Lärmniveau und verbessert zugleich die Verständlichkeit von Sprache sowie die Klangqualität anderer Schallquellen wie Musik.

SCHALLÜBERTRAGUNG ZWISCHEN RÄUMEN

Die Lärmübertragung zwischen benachbarten Räumen hängt unabhängig von der Geräuschquelle von der Bauweise und Beschaffenheit von Wänden und Böden ab. Dabei sind sowohl die Luftschalldämmung (Schall, der sich durch die Luft ausbreitet und auf eine Bauteiltrennung trifft) als auch die Trittschall- bzw. Körperschalldämmung (strukturell übertragene Schwingungen) von Bedeutung.

Die Luftschalldämmung beschreibt die Senkung des Schalldruckpegels eines Luftschallsignals beim Durchgang durch ein Trennbauteil. Sie wird bestimmt durch den Pegelunterschied des mittleren Schalldrucks auf beiden Seiten der Trennfläche über einen festgelegten Frequenzbereich hinweg.

Kann ein Bauteil – etwa eine Wand oder eine Decke – durch auftreffende Schallwellen in Schwingung versetzt werden, wirkt es auf der gegenüberliegenden Seite selbst als Schallquelle: Der Schall wird übertragen. Massivere Bauteile sind schwerer in Schwingung zu versetzen – daher gilt: Je größer die Masse und Dichte, desto besser die Schalldämmung.

Mit jeder Masseverdopplung erhöht sich die Schalldämmung um 6 Dezibel. Durch zusätzliche Masse kann also eine deutliche Verbesserung erreicht werden, doch stößt dieser Ansatz schnell an wirtschaftliche und bauliche Grenzen.

Der Standardindikator für Luftschalldämmung ist das Bau-Schalldämm-Maß „R“ (manchmal auch „Transmissionsverlust“ TL), angegeben in Dezibel. Wie die Absorption ist auch die Transmission stark frequenzabhängig, weshalb diese Werte in Terzbändern gemessen werden, um die frequenzabhängige bauakustische Leistung einer Struktur abzubilden.

Für die Bewertung der Luftschalldämmung existieren mehrere Klassifizierungssysteme, insbesondere die „Sound Transmission Class“ (STC; vorwiegend in den USA und Kanada verwendet) und das international geläufige „bewertete Schalldämm-Maß“ (Rw). Beide sind so genannte Einzahlangaben, also Einzelwerte in Dezibel, die eine vereinfachte Einschätzung der Dämmleistung ermöglichen.

Diese beiden Maße sind nicht direkt vergleichbar, da sie auf unterschiedlichen Frequenzbereichen basieren. In der Regel liegt der STC-Wert etwa 3-4 dB über dem entsprechenden Rw-Wert desselben Bauteils. Zudem beruhen beide Werte auf idealen Laborbedingungen, die in realen Anwendungen nur selten erreicht werden. Daher sind in vielen Bauvorschriften ergänzend Feldmessungen unter realen Bedingungen vorgeschrieben.

Außerdem ist Schalldämmung in hohem Maße frequenzabhängig, weshalb die genannten Einzahlangaben lediglich einen Gesamtüberblick liefern.

Hinzu kommt die sogenannte Flankenschallübertragung: Dabei umgeht der Schall die angebrachten Dämmbauteile – etwa über Luftspalten an Türen, Lüftungskanäle oder Kabeldurchführungen.

BODENBELÄGE UND AKUSTIK

KÖRPERSCHALLÜBERTRAGUNG

Der Boden beeinflusst die akustischen Eigenschaften eines Gebäudes auf vielfältige Weise. Besonders bedeutsam ist seine Rolle hinsichtlich der Schallübertragung über den Gebäudekörper. In Gebäuden mit mehreren Nutzern – z. B. Wohnanlagen, Bürokomplexe, Schulen oder Krankenhäuser – ist der Boden Zielscheibe diverser mechanischer Einwirkungen, von Trittschall über das Rollen von Transportwagen und Vibrationen durch Maschinen bis hin zu Stößen durch herabfallende Gegenstände.

Die dabei entstehenden Vibrationen pflanzen sich über starre Bauteilverbindungen – etwa zwischen Boden, Träger und Decke – in die Gebäudestruktur fort und werden in den darunterliegenden Räumen erneut als Schall abgestrahlt (siehe Abbildung 5). Trittschall ist somit nicht nur direkt im Raum hörbar, sondern wird über den Gebäudekörper übertragen.

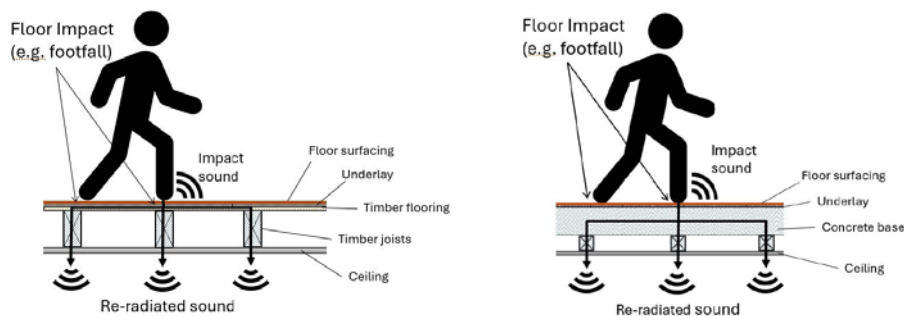


Abbildung 5 – Trittschall und seine Übertragungswege in typischen Bodenaufbauten (links: Holzbauweise, rechts: Beton)

Böden sind im Hinblick auf die Luftschalldämmung nach einem Rw- oder STC-Wert klassifiziert. Ebenfalls angegeben wird das Ausmaß der Wiederausstrahlung von Körperschall in darunterliegende Räume, in der Regel durch den bewerteten normierten Trittschallpegel (L_n,w) bzw. in Nordamerika anhand der Impact Insulation Class (IIC).

Für eine wirksame Trittschalldämmung muss die Struktur so beschaffen sein, dass sie mechanische Impulse abdämpft und die Übertragung von Vibrationen im Gebäudekörper verringert. Eine zentrale Rolle spielen dabei elastische Materialien, also Werkstoffe, die nicht vollständig starr sind, sondern eine gewisse Verformbarkeit und Rückstellfähigkeit besitzen.

Teppichböden oder weiche Vinylbeläge wirken stoßdämpfend, da sie sich beim Aufprall geringfügig verformen. Dies verringert die Amplitude der entstehenden Schwingung und damit sowohl den direkten Trittschall als auch den strukturell übertragenen Körperschall – typischerweise um mindestens 10 dB.

Gut abgestimmte elastische Unterlagen unter festen Bodenbelägen tragen erheblich zur Minderung der Schallübertragung in tragende Bauelemente wie Deckenbalken oder Betondecken bei. Bei Holzböden lässt sich mithilfe akustischer Unterlagen eine Reduktion der strukturellen Schallübertragung um rund 15 dB erreichen.

Dickere und dichtere Unterlagen verbessern die Trittschalldämmung eines Teppichbodens weiter. Darüber hinaus kann ein Unterboden, der auf einer Schallschutzmatte oder elastischen Lagerung ruht, bei allen Bodenbelagsarten zu einer deutlichen Schallminderung beitragen. Durch abgehängte, an schwingungsentkoppelten Trägern montierte Zwischendecken kann die Körperschalldämmung noch weiter verstärkt werden (Abbildung 6).

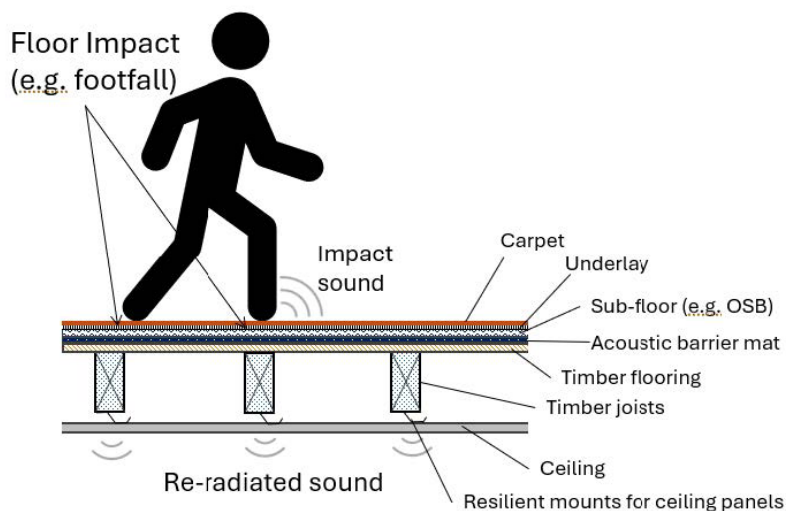


Abbildung 6 – Reduktion der Trittschallübertragung durch elastische Zwischenschichten

ABSORPTION UND NACHHALL

Harte Bodenbeläge wie Laminat, Parkett, Vinyl, Stein oder Beton weisen in der Regel sehr geringe Absorptionskoeffizienten auf (vgl. Abbildung 7). Dies führt zu verlängerten Nachhallzeiten, was wiederum den Lärmpegel erhöht und die Sprachverständlichkeit mindert.

Die Absorption poröser Materialien ist unmittelbar mit der Materialstärke verknüpft und dabei hochgradig frequenzabhängig. Die wirksamste Schallabsorption tritt ein, wenn die Materialdicke mindestens ein Viertel der Wellenlänge des betreffenden Schallsignals ausmacht; bei tieffrequentem Schall mit längeren Wellenlängen nimmt die Absorptionswirkung deutlich ab.



Abbildung 7 — Atrium mit hartem Bodenbelag
„The Atrium“ von itmpa, lizenziert unter CC BY-SA 2.0.

Im unteren Frequenzbereich der menschlichen Stimme (ca. 125 Hz) entspricht ein Viertel der Wellenlänge rund 69 cm. Selbst relativ dicke Teppiche bieten daher nur begrenzte Absorption in diesem Frequenzbereich (vgl. Abbildung 8). Im mittleren Frequenzbereich hingegen kann Teppichboden durchaus wirksam absorbieren: Ein 1 cm hoher Schnittflorteppich auf Beton erreicht bei 1000 Hz einen NRC-Wert von 0,4, was bedeutet, dass im Mittel 40 % der auftreffenden Schallenergie absorbiert werden. Bei einem 4-mm-Teppich mit Schaumbeschichtung liegt der Wert bei 0,25. [9]

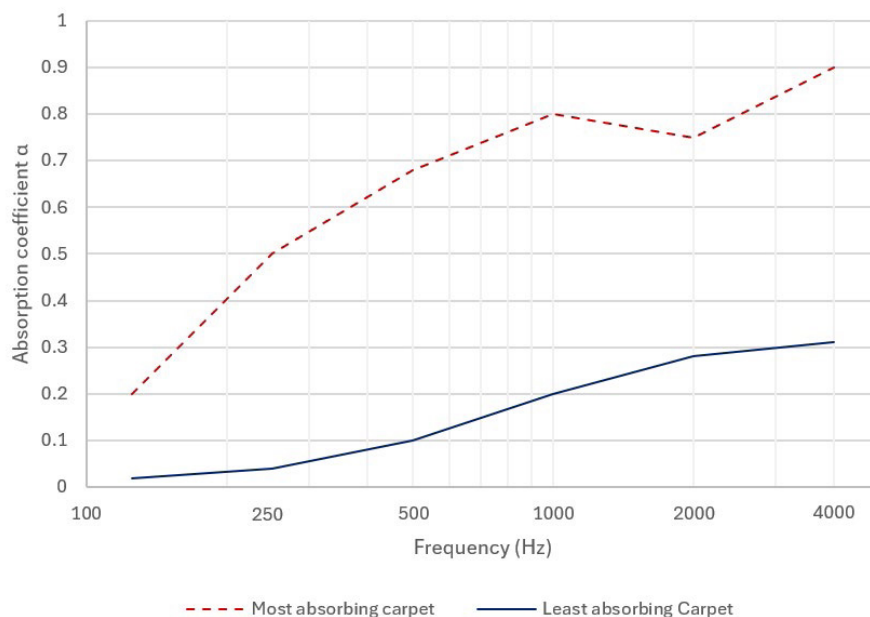


Abbildung 8 — Absorptionskoeffizienten leistungsstarker und leistungsschwacher Teppichböden. Abgeleitet aus [10]

Zwar stehen bei akustischen Maßnahmen Wand- und Deckenabsorber im Vordergrund, doch stellt auch der Boden eine großflächige Absorptionsfläche dar – sein Beitrag zur Akustik ist daher keineswegs zu unterschätzen. Da Dicke und Dichte eines Absorbers die Leistungsfähigkeit beeinflussen, sind hochflorige Teppiche mit schwerer Unterlage deutlich wirksamer als dünne Beläge ohne Unterlage. Ein vollflächig verlegter Teppichboden kann den Schalldruckpegel durch Nachhall im Vergleich zu einem harten Bodenbelag um etwa 3 dB senken.

DESIGNASPEKTE FÜR UNTERSCHIEDLICHE RAUMTYPEN

BÜROFLÄCHEN

Großraumbüros bringen besondere Herausforderung mit sich. Aus Nutzerperspektive bietet der „Open Space“ zwar Vorteile – etwa im Hinblick auf Wissensaustausch und niedrige Kommunikationsbarrieren –, doch gehen damit auch zahlreiche akustische Probleme einher, die die Nutzungsqualität beeinträchtigen können.



Abbildung 9 – Bayer-Büros – The Wings

Zu den häufigsten Beschwerden zählen Störungen durch andere Nutzer und ein Mangel an akustischer Privatsphäre. Gespräche, Trittschall, Geräusche von elektronischen Geräten (u. a. Telefone, Computer, Drucker oder Spezialausrüstung) schmälern die Vorteile offener Raumkonzepte.

Mitunter tritt der sogenannte Lombard-Effekt auf: Sobald mehrere Personen gleichzeitig sprechen, hebt jede ihren Lautstärkepegel an, um sich gegen die Umgebung durchzusetzen, sodass der Gesamtschallpegel im Raum kontinuierlich zunimmt. Eine einfache Gegenmaßnahme besteht darin, den verstärkenden Effekt raumakustischer Reflexionen durch den Einsatz absorbierender Elemente zu reduzieren und direkte Schallpfade zwischen Personen mithilfe von Raumteilern zu durchbrechen. Die Kombination aus Teppichbodenbelag und wand- oder deckengebundenen Absorbern wie z. B. akustischen Deckensegeln reduziert Reflexionen von Boden- und Deckenflächen (Abbildung 10).

Zwar stehen bei akustischen Maßnahmen Wand- und Deckenabsorber im Vordergrund, doch stellt auch der Boden eine großflächige Absorptionsfläche dar – sein Beitrag zur Akustik ist daher keineswegs zu unterschätzen. Da Dicke und Dichte eines Absorbers die Leistungsfähigkeit beeinflussen, sind hochflorige Teppiche mit schwerer Unterlage deutlich wirksamer als dünne Beläge ohne Unterlage. Ein vollflächig verlegter Teppichboden kann den Schalldruckpegel durch Nachhall im Vergleich zu einem harten Bodenbelag um etwa 3 dB senken.

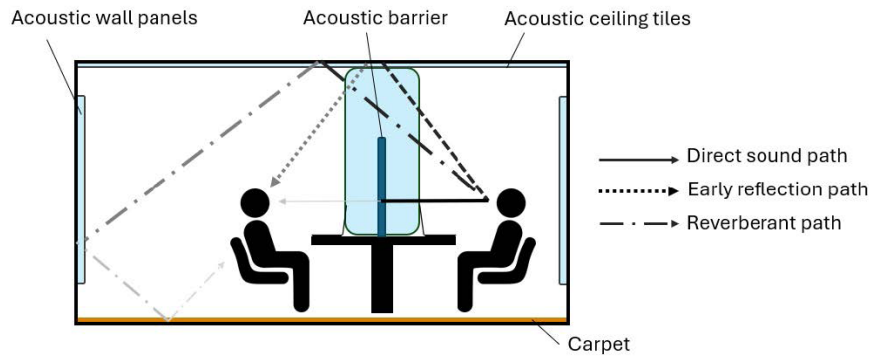


Abbildung 10 – Dämpfung des Gesprächsgeräuschpegels mittels Absorbern und Barrieren

GASTGEWERBE

Aktuelle Trends im architektonischen Design von Gastronomie- und Hotelbereichen stehen im Zeichen des „Industrial Look“ – mit freiliegenden Decken und sichtbaren Installationen. Dies führt zu tendenziell längeren Nachhallzeiten (Abbildung 11). In derart halligen Umgebungen werden Gespräche, Musik und Geräusche aus der Küche verstärkt, was die Möglichkeit zu ungestörter Kommunikation beeinträchtigt. Selbst die Wahrnehmung und der Geschmack von Speisen können unter dem Niveau und der Charakteristik von Hintergrundlärm leiden. [11] Da das Hauptproblem in der Regel eine übermäßige Nachhallbildung ist, lässt sich der akustische Komfort auch hier durch Einsatz absorbierender Materialien wie Teppichböden, Vorhänge oder Akustikpaneele verbessern.



Abbildung 11 – The Nightcar

GESUNDHEITSEINRICHTUNGEN

Krankenhäuser sind oftmals lärmintensive Orte. Geräuschquellen in einer Station sind u. a. Alarmer, Schritte, Stimmen, Abfallbehälter oder Türschließmechanismen. Hinzu kommen haustechnische Anlagen, Lüftungssysteme und Spezialgeräte sowie externer Lärm wie Straßenverkehr und Sirenen. Patienten sind für Belastungen anfälliger als Gesunde; lärmbedingter Stress und Störungen beeinträchtigen die Erholung und verzögern die Genesung.

Besonders hoch ist der Geräuschpegel in Intensivstationen mit durchschnittlichen Werten zwischen 60 und 67 dB(A) (siehe Abbildung 11). [12] Im Gegensatz zu Normalstationen gibt es dabei kaum tageszeitliche Schwankungen. [12] Ein nachtszeitlicher Schalldruckpegel über 55 dB(A) gilt für Patienten als gesundheitlich bedenklich. [13] Ein zentrales Problem resultiert aus dem Trittschall: Harte Bodenbeläge verstärken das Auftrittgeräusch, verlängern den Nachhall und führen potenziell zur Schallübertragung in darunterliegende Stockwerke.

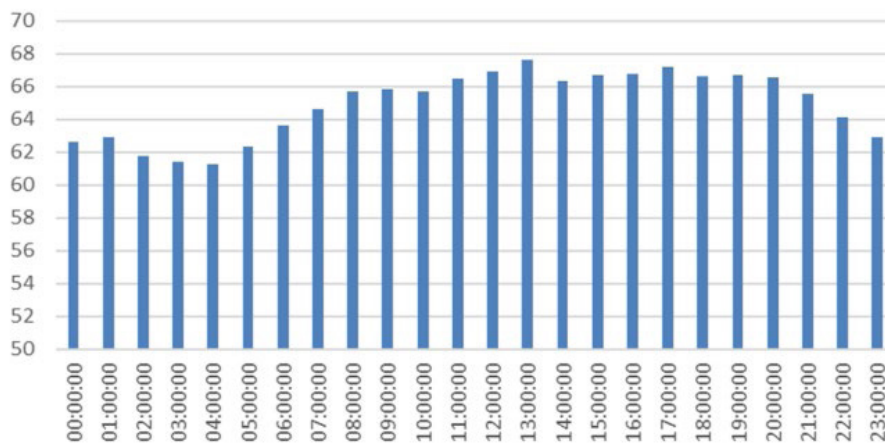


Abbildung 11 – Kombierter mittlerer LAeq-Wert pro Stunde in einer 18-Betten-Intensivstation (nach [12], Wiedergabe mit Genehmigung)

BILDUNGSEINRICHTUNGEN

Der entscheidende akustische Faktor in Schulen, Hochschulen und anderen Bildungseinrichtungen ist die einwandfreie Sprachverständlichkeit. Zwischen 45 % und 75 % der Zeit im Klassenzimmer verbringen Schüler damit, den Lehrkräften oder Mitschülern zuzuhören. [14] Ist die Sprachverständlichkeit schlecht, wird der Unterricht nicht aufgenommen, was den Lernerfolg erheblich beeinträchtigt. Mangelhafte Raumakustik kann sich negativ auf das Hörverstehen, das Kurzzeitgedächtnis, höhere kognitive Prozesse sowie die Sprachentwicklung der Lernenden auswirken.

Zu den Geräuschquellen zählen neben externem Lärm (u. a. Straßenverkehr, Fluglärm, Pausenhofaktivitäten) und anlagenbedingten Geräuschen und Vibrationen (z. B. Lüftungs- oder Heizsysteme) auch der Lärm durch Raumnutzung, sei es im Klassenzimmer selbst oder in angrenzenden Räumen (Abbildung 12).

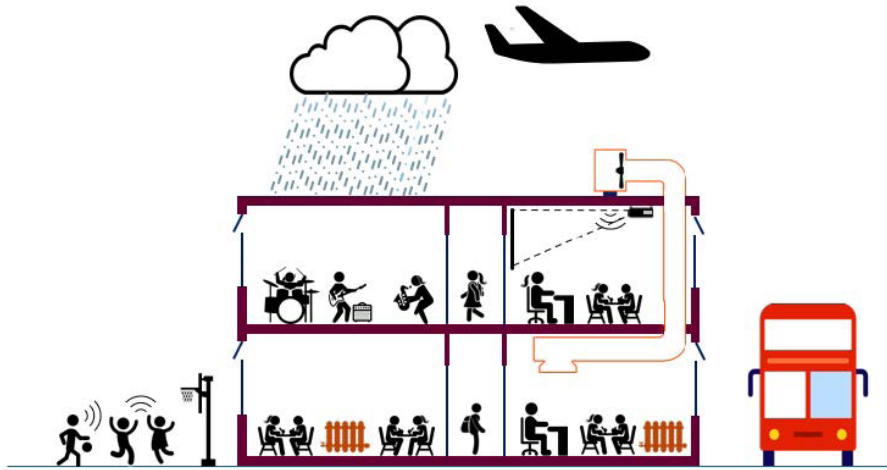


Abbildung 12 – Lärmquellen in schulischen Umgebungen (abgeleitet von [15])

In interaktiven Lernsituationen entsteht unweigerlich eine laute Geräuschkulisse im Klassenzimmer. In einem akustisch ungünstigen Raum führt dies durch den Lombard-Effekt zum kontinuierlichen Anstieg des Gesamtschallpegels. Dies erschwert nicht nur die Kommunikation, sondern stellt besonders für hörbereinträchtigte Schüler eine große Hürde dar. Kinder mit Geräuschüberempfindlichkeit wiederum erleben solche Umgebungen häufig als stark belastend, wodurch ihr Konzentrationsvermögen leidet.

Der Einsatz schallabsorbierender Materialien wie Teppichböden, Deckenabsorber oder Wandpaneele kann die Nachhallzeit reduzieren, was das Lärmniveau senkt und die Sprachverständlichkeit verbessert. Studien belegen, dass eine von etwa 1 Sek. auf ca. 0,5 Sek. verkürzte Nachhallzeit zu signifikant besseren Testergebnissen und einer höheren Merkfähigkeit führen kann. [14]

Körperschall durch körperliche Aktivität kann sich über den Boden auf darunterliegende Klassenräume übertragen, während sich Luftschall durch Wände, Decken und Böden ausbreitet. Elastische Bodensysteme – ob Akustikunterlagen, Dämmmatten, Teppich oder zusätzliche Masseeinträge – helfen, die Trittschallübertragung wirksam zu begrenzen.

INDUSTRIE- UND LAGERHALLEN

In großen Industrieanlagen besteht primär aus Sicht des Arbeitnehmerschutzes ein Bedarf an Lärmkontrolle. Einerseits gilt es, übermäßige Lärmbelastung abzuwenden, andererseits müssen Hörbarkeit und Verständlichkeit sicherheitsrelevanter Vorrichtungen (u. a. Alarmanlagen, Lautsprecherdurchsagen) gewährleistet sein.

In solchen Räumen ist der Einsatz schallabsorbierender Bodenbeläge in der Regel nicht praktikabel. Zur akustischen Optimierung kommen deshalb vorrangig Absorptionspaneele zum Zug, die an Wänden und Deckenflächen montiert werden (Abbildung 13).



Abbildung 13 – Schallabsorber in einer Industriehalle

AKUSTIKBÖDEN: INNOVATIONEN UND ZUKUNFTSTRENDS

In den vergangenen Jahren hat es zahlreiche Weiterentwicklungen im Bereich akustischer Bodensysteme gegeben, mit teils erheblichen Verbesserungen der akustischen Leistungsfähigkeit. Zugleich konnten Gewicht und Kosten reduziert oder die Verlegefreundlichkeit deutlich erhöht werden.

AKUSTIKUNTERLAGEN UND -AUFBAUTEN

Ein Akustikaufbau besteht aus einer starren Trägerschicht – etwa OSB-, Sperrholz- oder Spanplatten –, die mit einer elastischen Unterschicht, meist einem Polymer-Schaumstoff, verbunden ist. Der akustische Mehrwert ist ähnlich wie bei Unterböden, doch lassen sich solche Lösungen einfacher und mit geringer Aufbauhöhe anbringen. Sie können außerdem problemlos auf bestehende Bodenbeläge aufgebracht werden. Ist die Trägerschicht dicker (Fußbodenstärke), können diese Produkte teilweise auch wie ein neuer Bodenaufbau direkt auf Holzträgern installiert werden, ohne die Gesamthöhe des Bodenpakets wesentlich zu erhöhen (Abbildung 14, rechts).

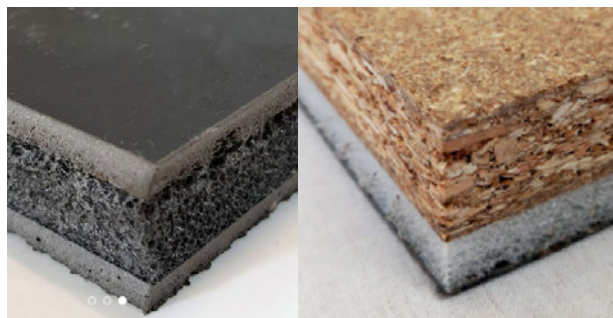


Abbildung 14 – Beispiele für Akustikunterlagen (SoundLay®, links) und Akustikaufbauten (SoundDeck Extra®, rechts).

Akustikunterlagen funktionieren ähnlich, bestehen jedoch meist aus mehrlagigen bzw. Sandwich-Materialien. Dabei liegt eine dichte Schaum- oder Vinylschicht auf einer weicheren, stärker komprimierbaren akustischen Schaumstofflage. Die oberste Schicht ist ausreichend steif, um den direkten Auftrag von Bodenbelägen zu ermöglichen. Im Vergleich zu klassischen Unterböden oder Aufbauten ist die Verlegung dadurch einfacher, und die Bodenhöhe fällt geringer aus (Abbildung 14, links). Neue akustische Werkstoffe ermöglichen dabei eine verbesserte Trittschalldämmung, ohne Komfort oder Langlebigkeit einzubüßen, und sorgen für einen optimierten Absorptionsgrad des Bodenbelags.

AKUSTIKTEPPICHE

Analog zu anderen akustisch wirksamen Bodenlösungen werden mittlerweile auch Teppichböden mit integrierter Akustikunterlage angeboten. Der Teppichrücken (Abbildung 15) ist dichter und dicker als bei herkömmlichen Teppichen und sorgt für eine entsprechend verbesserte Trittschalldämmung.

Zugleich bieten diese Teppiche ein hohes Maß an Schallabsorption und können so zur Reduktion der Nachhallzeiten und Hintergrundgeräusche beitragen. Durch das Zusammenspiel traditioneller Fasern und moderner Akustikschaumstoffe oder Aerogele kommt die Absorptionsleistung solcher Teppiche – trotz schlanker Produktstärke – mittlerweile an jene von Wandabsorbern heran.

Zudem bringen Akustikteppiche bei der Montage eine Zeit- und Kostenersparnis, da lediglich eine Bodenlage verlegt werden muss. In Form von modularen Akustikfliesen konzipiert, lassen sich einzelne Elemente bei Bedarf leicht austauschen oder wiederverwenden. Das bedeutet langfristig weniger Kosten und dauerhaften akustischen Komfort.



Abbildung 15— Teppich mit Akustik-Zweitrücken (comfortBACK®).

BIOPHILE DESIGNS UND BODENBELÄGE

„Biophilie ist das tief verwurzelte Bedürfnis des Menschen, sich mit der Natur zu verbinden.“ [16] Biophiles Design verfolgt das Ziel, ein gesundes Raumempfinden zu fördern, indem es Muster und Strukturen aus der natürlichen Umwelt in die Gestaltung aufnimmt. [17] Forschungsergebnisse legen nahe, dass selbst kleine Elemente natürlicher Gestaltung eine regenerative Wirkung entfalten können. Dementsprechend wächst das Interesse an biophilem Design als Beitrag zur Umweltqualität in Innenräumen.

Der Boden wird im biophilen Gestaltungsmodell häufig vernachlässigt (Abbildung 18), obwohl er eine wichtige Rolle für das Gesamtdesign spielt. Bodenbeläge und Teppiche können über Teppichfarben und -muster bzw. bei Hartböden durch den Einsatz echter Naturmaterialien wie Massivholz eine naturnahe Raumatmosphäre schaffen.



Abbildung 18 – Elemente biophilen Designs: Bepflanzung, echtes Holz, offene Raumgestaltung sowie natürliche Farben und Muster im Teppich (Insight Offices, Sheffield City Centre)

Die Kombination aus biophilen Bodenbeläge und akustisch wirksamen Komponenten wie einer Akustikunterlage ermöglicht es, zugleich die visuelle Qualität und den akustischen Komfort eines Raumes zu verbessern. Auf diese Weise leistet der Boden einen Beitrag zur ganzheitlichen Raumqualität.

NACHHALTIGKEIT UND AKUSTISCHE BODENLÖSUNGEN

Die heute gebräuchlichen Akustikmaterialien basieren zu einem erheblichen Teil auf nicht erneuerbaren Rohstoffen, die durch Rohstoffabbau gewonnen werden oder mit einem hohen Maß an grauer Energie verbunden sind. Insbesondere handelt es sich um erdölbasierte Kunststoffe (u. a. PET, Melaminschäume) und andere Polymere sowie geförderte oder abgebaute Materialien wie Gips oder Beton (u. a. zur Massenerhöhung von Akustikplatten). Gängige akustische Bodenlösungen kombinieren oft neopren- oder polyethylenbasierte Elastomere für Elastizität mit Beton oder Pressspan zum Massegewinn.

Dabei existieren zahlreiche nachhaltige Alternativen, die in puncto Schallabsorption und -dämmung hervorragende Eigenschaften mitbringen. In Frage kommen Schurwolle, die seit Jahrhunderten in hochwertigen Teppichen verwendet wird, ebenso wie recycelte Wolle und andere Wollqualitäten. Weitere natürliche Materialien wie Holzleisten, Korkmatten oder Naturkautschuk bieten insbesondere als Unterlagen eine solide Trittschall-, aber auch Wärmedämmung. Kork sowie nachhaltig bewirtschaftete Hölzer wie Bambus eignen sich hervorragend als Bodenoberflächen, da sie nicht nur den Trittschall im Raum drosseln, sondern sich mit ihrem Naturlook auch gut in biophile Designkonzepte einfügen.

Recycelte Kunststoffe lassen sich ebenfalls wirkungsvoll in Teppiche oder Unterlagen umwandeln. Biologisch abbaubare und Recyclingmaterialien werden sich immer stärker durchsetzen und bieten eine hohe akustische Leistungsfähigkeit bei minimaler Umweltbelastung.

Besonders vielversprechend sind Lösungen auf Basis recycelter Autoreifen: Weltweit fallen jährlich rund 1,5 Milliarden Altreifen an – ein Großteil davon landet auf Deponien, was ein erhebliches Umweltproblem darstellt. Dabei lässt sich das zu Granulat, Chips oder Pulver zerkleinerte Material problemlos weiterverarbeiten (Abbildung 19). [18] Neben der großen Verfügbarkeit des Ausgangsmaterials ist ein weiterer Vorteil, dass sich die Energieaufwendungen für die Verarbeitung im Vergleich zu vielen anderen Recyclingverfahren in Grenzen halten.



Abbildung 19 – Gummigranulat aus recycelten Autoreifen
(Bild von Michal Ďurfina, lizenziert unter CC BY-SA 4.0)

Aus verpresstem Gummigranulat hergestellte Matten bieten eine hervorragende Trittschalldämmung [19] und sind besonders geeignet für den Einsatz in Fitnessstudios, Sporthallen oder Industriehallen. Zudem verfügen sie über gute schallabsorbierende Eigenschaften (Abbildung 19). [20]

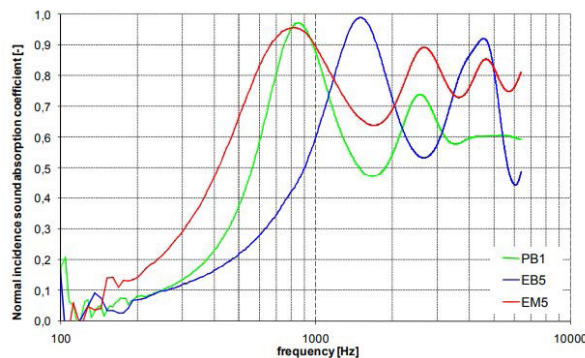


Abbildung 20 – Schallabsorptionskoeffizienten von drei Gummigranulatprodukten
(Materialstärke 48 mm, 38 mm bzw. 62 mm). Aus [20]:37

Natürliche Polymere (Biokunststoffe) umfassen unter anderem biobasiertes Vinyl, das aus pflanzlichen und holzbasierten Ölen gewonnen wird, und stellen eine nachhaltigere Alternative zu erdölbasierten Kunststoffen dar. Sie können als eigenständige Produkte eingesetzt werden – etwa für Teppiche, Unterlagen oder Akustikschaum – oder mit konventionellen Kunststoffen gemischt werden, um den CO₂-Fußabdruck zu senken. Darüber hinaus lassen sich Biokunststoffe auch aus der Aufbereitung von gebrauchten Speiseölen, Industriealtöl oder Plastikabfällen gewinnen. [21]

AKUSTISCHE METAMATERIALIEN

Akustische Metamaterialien sind speziell entwickelte Werkstoffe, deren Eigenschaften und Leistungsmerkmale über die Möglichkeiten konventioneller Materialien hinausgehen. Ziel ist es allen voran, mit möglichst schlanken und materialeffizienten Lösungen eine akustische Absorptionsleistung zu erzielen, wie sie bislang nur durch massive Bauteile erreichbar war. Hierfür werden häufig komplexe interne Strukturen genutzt – etwa zellartige Geometrien, die die Schallenergie besonders effektiv dissipieren. Alternativ kommen auch dynamische Mikrostrukturen zum Einsatz, die sich an äußere Reize anpassen können.

Obwohl in den letzten zehn Jahren zu akustischen Metamaterialien viel geforscht wurde [22], haben bis jetzt nur wenige dieser Materialien den Weg in die Praxis gefunden. Auch zur Eignung für den Bodenbelagsbereich liegen nur begrenzte Nachweise vor. Dieses Forschungsfeld schreitet indes rasant voran, weshalb in naher Zukunft mit der Verfügbarkeit von Metamaterialien für die Eindämmung strukturübertragener Schallanteile zu rechnen ist.

Metamaterialien bieten enormes Potenzial im Hinblick auf die Schallabsorption bei minimalen Materialstärken. Dadurch könnte es möglich werden, Teppiche oder Bodenbeläge mit vergleichbarer akustischer Wirksamkeit wie Wand- oder Deckenabsorber zu entwickeln, und integriert in ein Produkt, das ohnehin verlegt werden muss. Dies würde sowohl die Gesamtkosten als auch die Komplexität der Installation reduzieren.

SMARTE TEPPICHE UND INTEGRIERTE SENSORIK

Es gibt mittlerweile ultradünne Sensortechnologien, die auch in Teppichmaterialien oder Bodenunterlagen verbaut werden. Damit lassen sich Trittbewegungen und Erschütterungen erfassen, wodurch die Bodenoberfläche gewissermaßen als „Touchpad“ fungiert. Das schafft in Gesundheitseinrichtungen beispielsweise die Möglichkeit, Stürze zu erkennen [24] und Beleuchtungssysteme zu steuern. Zukünftige Systeme könnten darüber hinaus in der Lage sein, Geräusch- und Vibrationsniveaus kontinuierlich zu überwachen und mit akustischen Maskierungssystemen oder HLK-Anlagen zu interagieren, um den Raumklang dynamisch an die jeweilige Belegungssituation anzupassen.[25]

FALLSTUDIEN

BESPRECHUNGSRAUM / PROBLEME BEI VIDEOKONFERENZEN

Bei diesem Projekt ging es um den zentralen Meetingraum eines Designbüros (Abbildung 21) und die problematische Nachhallzeit, bedingt durch schallreflektierende Oberflächen, darunter Glaswände und ein Holzbodenbelag. Die Folge: eingeschränkte Sprachverständlichkeit bei Videokonferenzen und Probleme in Bezug auf die akustische Privatsphäre, zumal Gespräche im Meetingraum auch in benachbarten Büros hörbar waren und als störend empfunden wurden.

Da ein Großteil der Wandflächen für die Montage akustischer Elemente ungeeignet war, erfolgte die Nachhallkontrolle durch Absorber an der Decke und unmittelbar im Bereich um den Bildschirm, um Frühreflexion zu reduzieren, sowie durch einen vollflächigen Teppichboden mit Akustik-Zweitrücken, um die Schallabsorption zu erhöhen.

So konnte die Nachhallzeit von 1,1 Sekunden auf 0,5 Sekunden gesenkt werden, mit spürbar verbesserter Sprachverständlichkeit und reduziertem Nachhallpegel.



Abbildung 21 – Besprechungsraum.

TRITTSCHALL IM FITNESSSTUDIO

Die Umwandlung von Bestandsflächen zu Fitnessstudios ist eine gängige Praxis, ob in Wohngebäuden oder in Gebäuden mit gemischter Nutzung. Bei diesem Projekt wurde ein ehemals gewerblich genutztes Gebäude zu einer Mischimmobilie mit Wohnungen und Fitnessstudio umgebaut. Ausgangspunkt war ein entkernter Gewerbebau: Im Erdgeschoss befanden sich bereits bestehende Wohnungen, das erste Geschoss sollte ein Fitnessstudio beherbergen, und im zweiten sowie dritten Stockwerk sollten neue Apartments entstehen.

Die zentrale Herausforderung bestand darin, die Trittschallübertragung vom Fitnessbereich in die darunterliegenden Wohnungen zu unterbinden. Zum Einsatz kam ein leichter, schwingend gelagerter Bodenaufbau bestehend aus einer starren Unterbodenplatte, verlegt auf einer recycelten Gummigranulat-Akustikunterlage mit zusätzlicher Entkopplung der darunterliegenden Decke durch Akustikabhänger. Eine Schicht aus Mineralwolle und einer zweilagigen akustischen Gipskartonbeplankung sollte die Luftschalldämmung verstärken.



Abbildung 22: Gewichtsmattenbelag auf Fitnessboden

Um die Wirksamkeit verschiedener spezieller Trittschalldämmmatten für Fitnessstudios zu ermitteln, wurden Falltests mit 23 kg schweren Prüfungsgewichten durchgeführt (Abbildung 23). Das beste System erreichte gegenüber einem nackten Boden eine Verminderung des Trittschallpegels um 21 dB im darunterliegenden Stockwerk. Der leichte schwingend gelagerte Boden in Kombination mit der speziellen Trittschalldämmmatte bewirkte somit, dass der Geräuschpegel in den Wohnungen unterhalb der Grenzwerte bleibt.

PRAKTISCHE EMPFEHLUNGEN

Best Practices für die Auswahl akustioptimierter Bodenbeläge

Nutzung berücksichtigen: Soll der Bodenbelag strapazierfähig und leicht zu reinigen sein? Neuer Boden oder Nachrüstung: Müssen bestehende Bodensysteme (z. B. notwendige Aufbauten) berücksichtigt werden?

Vorrangige Akustikerfordernisse definieren: Reduktion von Trittschall- und/oder Körperschallübertragung in darunterliegende Stockwerke; und/oder Verkürzung der Nachhallzeit?

Einschränkungen oder Zielkonflikte bei Designanforderungen erkennen: In Gesundheitseinrichtungen etwa kommen Teppichböden im Hinblick auf die Infektionskontrolle teilweise nicht in Frage. Wo liegt der akustische Bedarf? Ein flächig verlegter Teppichboden kann das Diffusfeld um etwa 3 dB verkleinern und den Trittschallpegel mindestens um 10 dB eindämmen.

Nachhaltigkeitsaspekte: Würden auch nachhaltigere Materialien mit den gleichen akustischen Leistungsmerkmalen in Frage kommen?

Empfehlungen für die Zusammenarbeit mit Akustikexperten in Planung und Ausschreibung

Binden Sie einen Akustikfachmann möglichst früh in das Projekt ein, damit er umfassend am Planungsprozess mitwirken kann. Nachträgliche Korrekturen sind tendenziell kostspielig – der vorausschauende Rückgriff auf Fachkompetenz hilft, potenzielle Probleme frühzeitig auszumachen. Teilen Sie dem Akustiker alle relevanten Rahmenbedingungen und Anforderungen mit (z. B. Nachhaltigkeitskriterien bei Materialwahl). Achten Sie auf relevante Praxiserfahrung und Qualifikationen, etwa die Mitgliedschaft in einschlägigen Fachverbänden.

FAZIT

Eine gute akustische Umgebung ist für nahezu jede Nutzung eines Gebäudes von zentraler Bedeutung. Ob im Hinblick auf das Lernen in der Schule, die Konzentration und Zusammenarbeit im Büro, die Genesung im Krankenhaus oder die Erholung und Entspannung zu Hause: Die Akustik des Raumes hat maßgeblichen Einfluss auf seine Funktionalität.

Akustischer Komfort ist dabei ein fester Bestandteil der Umweltqualität in Innenräumen, also der umfassenden Wahrnehmung von Komfort in einem Gebäude. Gerade die Bodenfläche wird in der Akustikplanung oft unterschätzt, obwohl sie vielfältige Möglichkeiten bietet, den akustischen Komfort zu verbessern.

Teppiche mit Akustikunterlage können die Trittschallübertragung in darunterliegende Räume signifikant reduzieren. Auch Akustikteppiche und Bodenbeläge aus Kork oder Gummigranulat tragen durch ihre hohe Schallabsorption entscheidend zur Nachhall- und Lärmregulierung bei. Darüber hinaus können Bodenbeläge eingesetzt werden, um biophile Designansätze zu unterstützen – etwa durch die Integration natürlicher Materialien, Farben und Muster in die Bodengestaltung. Zugleich eröffnen sich immer mehr Möglichkeiten, auf nachhaltige Materialien zurückzugreifen, von Schurwolle bis hin zu Gummi- und Kunststoffrecyclaten.

QUELLENANGABEN

- [1] WHO, "Burden of disease from environmental noise: Quantification of healthy life years lost in Europe," WHO Regional Office for Europe, Copenhagen, 2011.
- [2] International Organisation for Standardization, "BS ISO 17772-1:2017. 'Energy performance of buildings. Indoor environmental quality. Indoor environmental input parameters for the design and assessment of energy performance of buildings'," ISO, Geneva, 2018.
- [3] M. Diaz, M. B. Piderit and S. Attia, "Parameters and indicators used in Indoor Environmental Quality (IEQ) studies: a review," Journal of Physics Conference Series vol. 2042, no. 1, 2021.
- [4] E. Azar, W. O'Brien, S. Carlucci, T. Hong, A. Sonta, J. Kim, M. S. Andargie, T. Abuimara, M. El Asmar, R. Jain, M. M. Ouf, F. Tahmasebi and J. J. Zhou, "Simulation-aided occupant-centric building design: A critical review of tools, methods, and applications," Energy.and. Buildings?.vol. 224, 2020.
- [5] O. Hahad, M. Kuntic, S. Al-Kindi, I. Kuntic, D. Gilan, K. Petrowski, A. Daiber and T. Münzel, "Noise and mental health: evidence, mechanisms, and consequences.," Journal of exposure. science.™.environmental.epidemiology?.2024.
- [6] J. M. Bliefnick, E. E. Ryherd and R. Jackson, "Evaluating hospital soundscapes to improve patient experience," Journal of the Acoustical. Society.of.America?.vol. 145, no. 2, 2019.
- [7] R. J. Peters, B. J. Smith and M. Hollins, Acoustics and Noise Control, Harlow: Pearson Education, 2011.
- [8] R. H. Palmer, "Noise in High Rise Buildings," in 86th.International. Congress on Sound and Vibration, Bangkok, 2013.
- [9] Carpet and Rug Institute, "Technical Bulletin - Acoustical Characteristics of Carpet," CRI, Dalton, 2014.
- [10] T. J. Cox and P. D'Antonio, Acoustic Absorbers & Diffusers, Boca Raton: CRC Press, 2009.
- [11] A. Woods, E. Poliakoff, D. Lloyd, J. Kuenzel, R. Hodson, H. Gonda, J. Batchelor, G. Dijksterhuis and A. Thomas, "Effect of background noise on food perception," Food Quality and Preference?.vol. 22, no. 1, pp. 42-47, 2011.
- [12] D. Dawson, R. Barham, M. Hamilton and B. Philips, "Towards the acoustical characterisation of an Intensive Care Unit," in European. Society of Intensive Care Medicine, 2018.
- [13] B. Berglund, T. Lindvall and D. H. Schwela, "Guidelines for Community Noise," World Health Organisation, Geneva, 1999.
- [14] B. Shield and J. Dockrell, "The effects of environmental and classroom noise on the academic attainments of primary school children," Journal of the Acoustical Society of America. vol. 123, pp. 133-144, 2008.
- [15] Department for Education, "Building Bulletin 93: acoustic design of schools - performance standards," DfE, London, 2003.
- [16] C. O. Ryan, W. D. Browning, J. O. Clancy, S. L. Andrews and N. B. Kallianpurkar, "Emerging Nature-Based Parameters for Health and Well-Being in the Built Environment," International Journal of Architectural Research. vol. 8, no. 2, pp. 62-75, 2014.
- [17] Y. Al-Dmour and V. Garaj, "Flourishing the Biophilic Workplaces: A Co-Design Toolkit," in TWR.8688, Milan, 2022.

- [18] J.-A. Balmori, M. Casado-Sanz , M. Machimbarrena, S. Quirós-Alpera, R. Mostaza and L. Acuña, "The Use of Waste Tyre Rubber Recycled Products in Lightweight Timber Frame Systems as Acoustic Insulation: A Comparative Analysis of Acoustic Performance," *Buildings?*.vol. 14, no. 1, 2024.
- [19] J. Pfretzschner and R. M. Rodriguez, "Acoustic properties of rubber crumbs," *Polymer Testing*.vol. 18, no. 12, pp. 81-92, 1999.
- [20] F. Asdrubali, F. D'Alessandro and S. Schiavoni, "Sound absorbing properties of materials made of rubber crumb," in *Acoustics*.6, Paris, 2008.
- [21] H. Abrha, J. Cabrera , Y. Dai, M. Irfan, A. Toma, S. Jiao and X. Liu, "Bio-Based Plastics Production, Impact and End of Life: A Literature Review and Content Analysis," *Sustainability?*.Vols. 14, , no. 4855, 2022.
- [22] A. Arjunan, A. Baroutaji, J. Robinson, A. Vance and A. Arafat, "Acoustic metamaterials for sound absorption and insulation in buildings," *Building and Environment* .vol. 251, 2024.
- [23] FutureShape, "SensFloor," 11 February 2025. [Online]. Available: <https://future-shape.com/en/system/>. [Accessed 11 February 2025].
- [24] M. A. Aud, C. C. Abbott,, H. W. Tyrer, R. V. Neelgund, U. G. Shriniwar, A. Mohammed and K. K. Devarakonda, "Smart Carpet: Developing a sensor system to detect falls and summon assistance," *Journal of Gerontological Nursing*. vol. 36, no. 7, 2010.
- [25] Build Review, "Smart Carpets for Smart Solutions," *Build Review*, 22 September 2021. [Online]. Available: <https://www.build-review.com/smart-carpets-for-smart-solutions/>. [Accessed 14 Feb 2025].