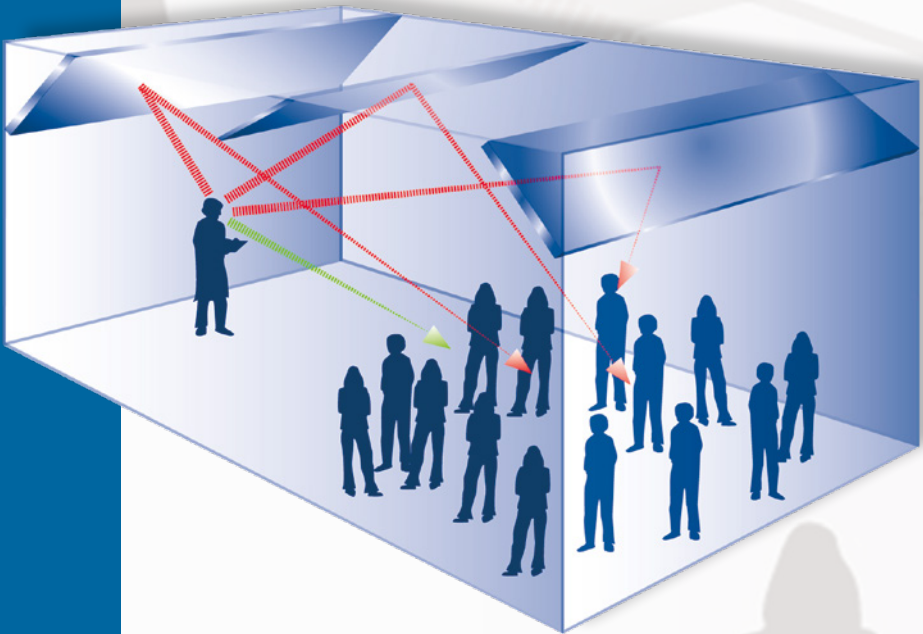


Christian Nocke

Raumakustik im Alltag

Hören – Planen – Verstehen

2., überarbeitete und erweiterte Auflage



Fraunhofer IRB  Verlag

Christian Nocke

Raumakustik im Alltag

Christian Nocke

Raumakustik im Alltag

Hören, Planen, Verstehen

2., überarbeitete und erweiterte Auflage

Fraunhofer IRB Verlag

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über www.dnb.de abrufbar.

ISBN (Print): 978-3-8167-9896-5

ISBN (E-Book): 978-3-8167-9958-0

Lektorat: Sigune Meister

Herstellung: Gabriele Wicker

Layout und Satz: Christian Nocke

Umschlaggestaltung: Martin Kjer

Druck: Offizin Scheufele Druck und Medien GmbH + Co.KG, Stuttgart

Bildrechte: Christian Nocke, Anne-Marie Pogoda-Dorsch

Die hier zitierten Normen sind mit Erlaubnis des DIN Deutsches Institut für Normung e. V. wiedergegeben.

Maßgebend für das Anwenden einer Norm ist deren Fassung mit dem neuesten Ausgabedatum, die bei der Beuth Verlag GmbH, Burggrafenstraße 6, 10787 Berlin, erhältlich ist.

Alle Rechte vorbehalten.

Dieses Werk ist einschließlich aller seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die über die engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes hinausgeht, ist ohne schriftliche Zustimmung des Fraunhofer IRB Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Speicherung in elektronischen Systemen. Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen und Handelsnamen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass solche Bezeichnungen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und deshalb von jedermann benutzt werden dürften. Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z. B. DIN, VDI, VDE) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert werden, kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.

© Fraunhofer IRB Verlag, 2019

Fraunhofer-Informationszentrum

Raum und Bau IRB

Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart

Telefon +49 711 970-2500

Telefax +49 711 970-2508

irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

Inhaltsverzeichnis

Vorworte	7
1 Einführung	11
2 Allgemeine Begriffe der Akustik	15
2.1 Schalldruck, Schallpegel, Pegelrechnung	15
2.2 Frequenz, Tonhöhe, Wellenlänge	23
2.3 Wahrnehmung von Schall	31
2.4 Bewertung von Schall	40
3 Grundlagen der Raumakustik	49
3.1 Historischer (Literatur-)Rückblick	49
3.2 Schallausbreitung	52
3.3 Schall und Materialien – Absorption, Reflexion, Diffusion	59
3.4 Schallabsorber – Absorptionsgrade	62
3.4.1 Poröse Absorber	65
3.4.2 Resonanzabsorber	67
3.5 Messung akustischer Materialkennwerte	69
3.5.1 Kundtsches Rohr	69
3.5.2 Hallraum	71
3.5.3 Weitere Messverfahren	80
3.6 Kenngrößen der Schallabsorption	82
3.6.1 Äquivalente Absorptionsfläche	82
3.6.2 Bewerteter Schallabsorptionsgrad	85
3.6.3 NRC und SAA	89
3.6.4 Absorption von Einzelobjekten	90
3.6.5 Weitere Kenngrößen der Schallabsorption	94
4 Raumakustische Kenngrößen	95
4.1 Vorbemerkung – Raumgröße und Form	96

4.2	Nachhallzeit	99
4.3	Sprachverständlichkeit	105
4.4	Weitere Kenngrößen	111
4.5	Messung der raumakustischen Parameter	117
5	Anforderungen und Empfehlungen	121
5.1	Gesetzliche Grundlagen	121
5.2	Normen	124
5.2.1	DIN 18041 »Hörsamkeit in Räumen«	124
5.2.2	VDI 2569 »Schallschutz und akustische Gestaltung im Büro«	146
5.3	Vorgaben aus dem Bereich Arbeitsschutz	158
5.3.1	ASR A3.7 »Lärm«	159
5.3.2	»TRLV Lärm 3« und weitere Vorgaben	167
5.4	Weitere Angaben und Empfehlungen	169
6	Raumakustische Planung	181
6.1	Planungsablauf	182
6.2	Klassisch: Sabinesche Nachhallformel	188
6.3	Planungsbeispiele	193
6.4	Grenzen und Erweiterungen der klassischen Betrachtung	202
6.5	Schallpegel im Raum	210
6.6	Schallabschirmung	215
6.7	Rechnergestützte Verfahren - Computersimulation	221
6.8	Raumakustik und HOAI	238
7	Beispiele aus der Beratungspraxis	243
7.1	Klassenräume	244
7.2	Büroräume	250
7.3	Mensa/Kantine	260
7.4	Restaurants	264
7.5	Pausenhalle	267
7.6	Sporthallen	269
7.7	Schwimmbäder	273
8	Anhang	277
8.1	Materialdaten	277
8.2	Literaturverzeichnis	323
8.3	Abkürzungsverzeichnis	338
8.4	Stichwortverzeichnis	340

Vorwort zur 2. Auflage

Liebe Leserin, lieber Leser,

Sie haben sich für den Kauf eines Buches entschieden, das einen ausgewiesenen Rundgang durch einen Zweig der Angewandten Akustik bietet. Das Buch spiegelt an vielen Stellen die wissenschaftliche Entwicklung seines Autors, teilweise geprägt durch die Raumakustik beim Stuttgarter Fraunhofer-Institut für Bauphysik und die Oldenburger Hörforschung. Hier in Oldenburg öffnen sich viele Zugänge zur Hörforschung, bei der seit der Universitätsgründung eine sehr breite Zusammenarbeit physikalischer, psychologischer und medizinisch-physiologischer Akustik stattfindet. Christian Nocke hat sich vorbehaltlos auf dieses interdisziplinäre Forschen eingelassen. Dabei haben wir erlebt, wie er sein ingenieurwissenschaftlich-technisches Methoden-Wissen einbrachte und damit viele konkrete Probleme einer unzureichenden Raumakustik löste. Messmethoden, Werkstoffe und Bauweisen befinden sich ja in ständiger Veränderung. Der vorliegende Text vermittelt sowohl die physikalischen Grundlagen als auch deren Konkretisierung bei der Lösung unterschiedlicher Probleme.

Die besondere Herausforderung einer Raumakustik liegt ja gerade darin, dass es immer um Menschen geht, die mit ihrem Hören in einem Raum zurechtkommen müssen oder sich dort gar besonders wohlfühlen wollen. Der Physiker nimmt hier zur Kenntnis: Plötzlich wird er hier mit »subjektiven« Hörempfindungen und Gefühlen konfrontiert, obwohl die Physik per definitionem alles Subjektive, alle Wertungen, Bedeutungszuschreibungen, Bewusstseinsinhalte überhaupt aus ihrem Gegenstandsbereich ausschließt. Wie man dieses Dilemma auflösen kann, zeigte Gustav Theodor Fechner in seinem 1860 erschienenen Werk »Elemente der Psychophysik« und schuf damit die wissenschaftlichen Grundlagen einer fruchtbaren Zusammenarbeit von Psychologie und Physik. Insbesondere in der Akustik hat sich diese neue Arbeitsweise bewährt; man denke hier beispielsweise an die Entdeckungen von Hermann von

Helmholtz. Die Hörempfindungen bzw. die Hörwahrnehmung wurden in der experimentellen Psychologie seit mehr als hundert Jahren zu einem zentralen Forschungsfeld. Das vorliegende Buch steckt voll von diesen psychophysischen Ideen und Methoden.

Sehr hilfreich finde ich, dass jedes Kapitel mit einem Blick auf historische Entwicklungen und vor allem die weiterführende aktuelle Literatur beginnt. Gerade auch die Technische Akustik besteht in ihren Verzweigungen aus einem Gebilde komplexer mathematischer Formeln, die sehr abschreckend wirken können. Dies mag auch ein Grund sein, warum die Raumakustik nicht gerade als das Lieblingsfach in der Architekturausbildung gilt. Raumakustik wird vielleicht auch deshalb bei der Planung gerne übergangen. Christian Nocke ist es nach meiner Meinung gelungen, uns Nicht-Physikern die Angst vor den Formeln zu nehmen, weil sie sorgfältig und an treffenden Beispielen erklärt werden. Beispielen aus der eigenen Praxis widmet er deshalb sogar ein eigenes Kapitel.

Wir sind im Alltag noch weit weg von einer guten Akustik in Gaststätten, Kirchen, Wohnungen, Kindergärten und Schulen. Deshalb finde ich es besonders erfreulich, dass sich das Buch um diese Bereiche besonders ausführlich kümmert. Erfreulicherweise hat Christian Nocke gerade in der Klassenraum- und Schulakustik schon viel bewegt und verbessert. Man mag es ja nicht glauben, dass wir in einer Zeit, in der manche schon über die Besiedelung des Mondes nachdenken, noch unter vielen alltäglichen Hörproblemen leiden. Die zunehmende Schwerhörigkeit in der Bevölkerung stellt plötzlich auch den Raumakustiker vor neue Probleme.

Ich bin zuversichtlich, Christian Nocke bietet mit seinem Buch viele Anregungen; ich wünsche ihm eine geneigte und dankbare Lesergemeinde.

Oldenburg, im März 2019

Prof. Dr. August Schick

Vorwort zur 1. Auflage

Akustik ist die Lehre von mechanischen Schwingungen und Wellen, von deren Erzeugung, Ausbreitung, Messung und – für einen kleinen Ausschnitt von Schwingungsfrequenzen und Wellenlängen – von deren Wahrnehmung. Wir vermögen einen Teil der akustischen Naturerscheinungen mit unseren Sinnen zu erfassen. Damit wird das objektiv Physikalische mit dem subjektiv Erlebten verbunden. Der Hörbereich mechanischer Wellen ist besonders hervorzuheben aus der vielfältigen Erscheinung und breiten Anwendung akustischer Phänomene, die von langsamen seismischen Schwankungen oder wetterbedingten Luftdruckwechseln über Straßenlärm, Musik, Kommunikationsakustik, Ultraschalldiagnostik bis hin zu hochfrequenten Vibrationen in Kristallen und Halbleitern für moderne elektronische Signalverarbeitung reichen.

Akustik ist ein Teil der Physik, in der Anwendung ein Objekt der Ingenieurwissenschaft. Ohne Physik und ohne Ingenieurkunst lassen sich akustische Phänomene nicht verstehen und nur intuitiv beeinflussen. Die Geigen alter Meister oder die Akustik antiker Amphitheater wurden zwar ohne die Kenntnisse moderner physikalischer Technik in kunstvoller Vollendung gestaltet, aber es lag der Fertigung ein Wissen und langjährige Erfahrung über akustische Wellen und Schwingungen zugrunde, die nicht notwendigerweise in mathematischen Formeln festgeschrieben werden mussten. Weil Physik und Technik auch die Basis der Hörakustik sind, kann das Gehörte – sei es im Konzertsaal, sei es in der Kommunikation im Großraumbüro, sei es beim Lernen und Verstehen im Klassenzimmer – nicht ohne Kenntnis der physikalisch-technischen Grundlagen verändert werden; und »Veränderung« heißt hier im Allgemeinen eine zur »guten« Akustik. Es ist daher zu begrüßen, dass ein ausgewiesener Physiker mit umfangreicher Erfahrung in technischer Akustik sein praktisches Wissen in einem fundierten Werk zu einem wichtigen Teilgebiet der »Akustik in Räumen« veröffentlicht, nämlich zu Räumen, in denen wir uns im Alltag aufhalten: Wohnungen, Büros, Schulen, Restaurants, Mehrzweckhallen etc. Es geht hierbei nicht um ein abstraktes Lehrbuch der Akustik, sondern um die konkrete

Anwendung zur Lösung alltäglicher akustischer Probleme bzw. zur nachhaltigen Planung. Sogenannte Akustikprobleme lassen sich von Anfang an vermeiden.

Weil die nutzbringende Beeinflussung akustischer Wellenausbreitung in Räumen der tieferen physikalischen Kenntnis bedarf, vermittelt das Buch zunächst die Grundlagen der Raumakustik. Eine wichtige Maßnahme, um »gute« Akustik zu erzielen, ist die differenzierte Absorption akustischer Energie – ein Gebiet, auf dem der Autor sehr erfolgreich wissenschaftlich geforscht hat. Die Grundlagen werden im Text mit der Fülle ingenieurwissenschaftlicher und technischer Erfahrung verbunden und erläutert, die in Regelwerken, Normen und Empfehlungen niedergeschrieben sind. Ein Schwerpunkt liegt – wie der Titel andeutet – in jenen Kenngrößen, die sich auf die Raumakustik beziehen. Besonders hilfreich ist es, dass sogleich auch realistische Planungsabläufe zur objektbezogenen Optimierung der Akustik einschließlich des darin befindlichen Mobiliars ausführlich beschrieben werden. In vielen Tabellen und Grafiken werden die akustischen Normen, Vorschriften und Empfehlungen so veranschaulicht, dass es auch »Nicht-Akustikern« gelingen sollte, wertvolle Hinweise in die Planung einzubeziehen. Tabellen mit akustischen Materialkenngrößen ergänzen das Werk.

Die praxisnahe Darstellung verbindet der Autor auch mit kritischen Anmerkungen zu fehlerhaften oder zumindest unzumutbaren Empfehlungen, die sich leider in manchen Schriften halten. Die Räume des Alltags werden oft ohne die Kenntnis entworfen und gebaut, die ein akustisch stressfreies Arbeiten, Lernen, Verweilen ermöglicht. Das Buch »Raumakustik im Alltag« ist eine hervorragende Planungshilfe für alle Menschen, die mit der Architektur, dem Bau oder dem Design der Räumlichkeiten befasst sind, in denen wir uns Tag für Tag aufhalten. Ich hoffe, dass die kenntnisreichen Ausführungen auf offene und nicht auf taube Ohren treffen!

Oldenburg, im Juni 2014

Prof. Dr. Volker Mellert

1 Einführung

Dieses Buch geht auf die raumakustischen Anforderungen in verschiedenen Räumen des Alltags ein. Die dargestellten Anforderungen, Empfehlungen und Hinweise unterstützen die Raumakustikplanung auf dem Weg zu einer »guten Akustik«. Vom heimischen Umfeld und Wohnräumen über öffentliche Räume wie Schulen bis hin zu Arbeitsräumen wie Büros wird die Bedeutung der Raumakustik erläutert. Das Hören für alle Menschen an jedem Ort zu jeder Zeit ist hierbei als Leitlinie zu verfolgen.

Die Raumakustik als Teilgebiet der Akustik beschäftigt sich mit der Schallausbreitung in Räumen. Neben der Raumform, der Gestaltung der Raumausstattung und den Festlegungen von Hörer- und Sprecherpositionen sind für die Wahrnehmung und Bewertung der akustischen Bedingungen auch subjektive Empfindungen und Erfahrungen der Menschen in den jeweiligen Räumen von großer Bedeutung. Was eine »gute Akustik« ist, lässt sich mitunter nicht eindeutig definieren, solange nicht die subjektiven Erwartungen und Vorerfahrungen der Nutzer eines Raumes bekannt sind. Insofern wird die Raumakustik immer auch durch das Wechselspiel zwischen Nutzung und Raumgestaltung geprägt.

Die Einschätzung und Wahrnehmung der Akustik in einem Raum ist ein Vorgang, der von vielen technischen, aber auch subjektiven Faktoren beeinflusst wird. Physik, Psychoakustik, Architektur, Innenarchitektur und Raumausstattung tragen zum Gelingen einer angemessenen und letztlich der für die Nutzung eines Raums passenden Akustik bei. Bei der Planung und raumakustischen Gestaltung von Räumen sind neben den bautechnischen Aspekten auch die Erwartungen, Wünsche und Erfahrungen der Nutzer von großer Bedeutung. In Abbildung 1.1 sind weitere Einflussfaktoren auf die Raumakustik dargestellt. Akustisch wirksame Oberflächen müssen auch anderen bauphysikalischen Anforderungen entsprechen und stellen häufig auch ein Gestaltungselement in einem Raum dar. Effiziente Schallabsorber, die keine Lichtreflexion ermöglichen oder aber brennbar sind, wären nicht zur raumakustischen Gestaltung zu gebrauchen.

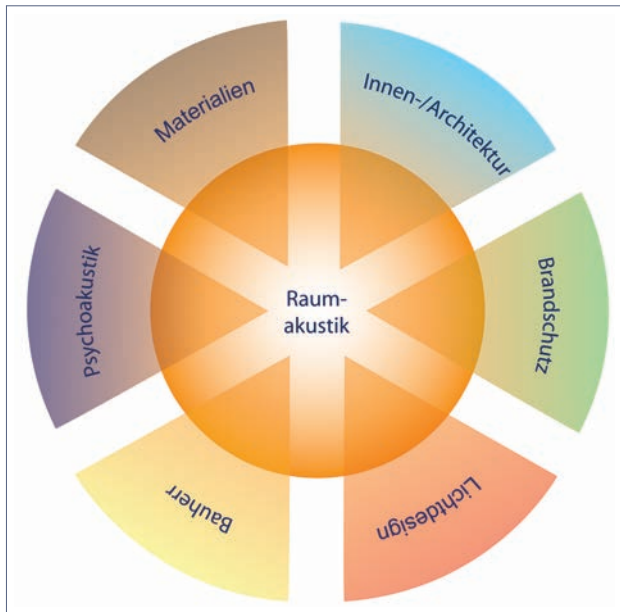


Abbildung 1.1 Einflussfaktoren auf die raumakustische Gestaltung von Räumen

Musik und Sprache, elektrisch verstärkte und unverstärkte Musik, aber auch Kommunikation und Konzentration, stellen einige Gegensätze in der raumakustischen Gestaltung von Räumen dar. Auf dieses generelle Problem der Mehrzwecknutzungen in Teilen der Raumakustik wird im Laufe dieses Buches eingegangen. Gerade im Bereich der Musik sind vielfältigste Erwartungen und Nutzungen kaum in nur einem Raum zu vereinen. Hierzu wird in diesem Buch auf die umfangreiche Literatur zur Akustik von Räumen für Musik verwiesen. Fragen nach dem besten Konzertsaal der Welt, dem klangvollsten Opernhaus oder aber der ruhigsten Kirche sind vor diesem Hintergrund nicht sinnvoll zu stellen. Hingegen sind Erfordernisse für die Gestaltung einer angenehmen und behaglichen Akustik in Räumen des Alltags vergleichsweise leicht zu beschreiben und umzusetzen. Es mag daher erstaunen, dass immer noch viele Schulen, Restaurants, Einkaufszentren, Schwimm- und Sporthallen und andere Räume über ausgesprochen ungünstige raumakustische Bedingungen verfügen.

Der Wunsch nach Ruhe und Behaglichkeit gewinnt an vielen Orten und auch in Räumen immer mehr an Bedeutung. Unerwünschte Geräusche bzw. Lärm

werden zunehmend als Belastung oder zumindest als Belästigung wahrgenommen. Demgegenüber stehen gestalterische und bauphysikalische Trends in der modernen Architektur, die angemessene raumakustische Bedingungen in Räumen regelrecht verhindern. Minimalistische, glatte und akustisch reflektierende Oberflächen, wie Beton oder Glas, aber auch thermisch aktivierte Bauteile sind Beispiele dieser Trends.

Mit diesem Buch soll Bauherren, Architekten, Innenarchitekten und anderen, für die die Raumakustik nicht den Schwerpunkt ihrer Arbeit darstellt, ein Leitfaden und eine Übersicht an die Hand gegeben werden, anhand dessen sich angemessene raumakustische Bedingungen in Räumen des alltäglichen Lebens erzielen lassen.

Für dieses Ziel werden – wo es sinnvoll erscheint – Vereinfachungen getroffen und überschlägige Betrachtungen präsentiert. Dieser bewusst gewählte Ansatz soll es auch Nicht-Akustikern ermöglichen, sich dem ab und an komplex erscheinenden Thema Raumakustik zu nähern. Durch Hinweise auf weiterführende Literatur wird die Möglichkeit eröffnet, das Thema zu vertiefen.

Letztlich bedeutet raumakustische Planung eine berechenbare Tätigkeit, die als Ergebnis ein konkret messbares Resultat erzielt: im besten Fall eine der Nutzung angemessene Hörsamkeit des Raums, in dem sich die Menschen wohlfühlen, in dem sie ohne Mühe die gewünschte Kommunikation führen können und der nicht als zu laut oder zu leise empfunden wird. Zu zeigen, wie dies auch in den Räumen des Alltags gelingen kann, ist Ziel dieses Buches.

Die einzelnen Kapitel bauen teilweise aufeinander auf. In Kapitel 2 werden die zum weiteren Verständnis der Raumakustik notwendigen Begriffe und Zusammenhänge kurz erklärt. Schalldruckpegel und Frequenz als zentrale physikalische Größen der Akustik wie auch einige Anmerkungen zur Wahrnehmung und Bewertung von Schallereignissen werden dargestellt.

In Kapitel 3 folgt nach einem kurzen Rückblick auf die Literatur zur Raumakustik eine Einführung in die Grundlagen. Schallausbreitung in Räumen wie auch die Beschreibung von Materialien aus dem Blickwinkel des Raumakustikers dienen dem Verständnis von Messverfahren zur Absorption und deren Bewertung.

Die akustischen Kenngrößen in den Räumen des Alltags werden in Kapitel 4 eingeführt und erläutert. Auch wenn eine Vielzahl von Kenngrößen inzwischen leicht gemessen oder durch Simulation berechnet werden können, genügt es in vielen Räumen mit einer geringen Anzahl der bekannten Kenngrößen zu agieren.

In Kapitel 5 werden die einschlägigen Anforderungen und Empfehlungen zur Raumakustik von Alltagsräumen zusammengefasst. Hierbei sind aktuelle Entwicklungen aus der Normung wie auch aus dem Arbeitsschutz berücksichtigt, u.a. wird die Neufassung der VDI-Richtlinie 2569 »Schallschutz und akustische Gestaltung im Büro« zusammengefasst. Außerdem wird die überarbeitete DIN 18041 »Hörsamkeit in Räumen – Anforderungen, Empfehlungen und Hinweise für die Planung« aus dem Jahr 2016 vorgestellt und kommentiert. Als aktuellste Neuerung wird die Technische Regel für Arbeitsstätten ASR A3.7 »Lärm« vom Mai 2018 in einem eigenen Unterkapitel vorgestellt. Neben diesen maßgeblichen Regelwerken für die Räume des Alltags werden weitere Empfehlungen und Hinweise aus anderen Quellen zusammenfassend beschrieben.

In Kapitel 6 wird das Thema raumakustische Planung behandelt. Nach einer allgemeinen Beschreibung des Ablaufs wird anhand eines konkreten Beispiels die Durchführung einer Planung demonstriert. Nachfolgend werden die Grenzen der klassischen Sabineschen Betrachtung diskutiert. Das insbesondere in der Büroplanung wichtige Thema »Schallschirmung« sowie ein Ausblick auf computergestützte Rechenverfahren zeigen mögliche Vertiefungen der raumakustischen Planung auf. Schlussendlich widmet sich das Kapitel dem Thema der HOAI, wobei der Schwerpunkt auf den Leistungsphasen und notwendigen Leistungsbildern liegt.

Den Abschluss bilden das Kapitel 7 mit Beispielen aus der Beratungspraxis des Autors sowie der Anhang mit einer umfangreichen Sammlung von Absorptionswerten, mit deren Hilfe die raumakustische Planung erleichtert wird.



Zur Lektüre des Buches sind besondere mathematische oder physikalische Kenntnisse nicht als Voraussetzung zu sehen; das gängige Schulwissen dieser Fächer sollte genügen. Die diesem Buch beigefügten Hörbeispiele zu einigen der beschriebenen Sachverhalte sind durch das an der Seite dargestellte Symbol gekennzeichnet und unter folgender Kurz-URL als Download verfügbar: http://s.fhg.de/hoerbeispiele_Aufl_2

2 Allgemeine Begriffe der Akustik

In diesem Abschnitt werden die zum weiteren Verständnis wichtigen Begriffe und Zusammenhänge zusammengestellt und erläutert. Wissenschaftliche Grundlagen der Akustik und der Raumakustik sind nicht in diesem Buch zu finden; auf die dafür ausgelegte weiterführende Literatur wird jedoch verwiesen, sodass der Leser bei Interesse diese weiter verfolgen kann. Außer den physikalischen Grundbegriffen werden arbeitsrechtliche Begriffe und Definitionen, die speziell in Arbeitsräumen Anwendung finden, dargestellt.

Neben den physikalischen Zusammenhängen spielt in der Raumakustik auch immer die subjektive Wahrnehmung des Gehörten eine wichtige Rolle. Daher sind im Folgenden auch einige der für die Raumakustik in Alltagsräumen wichtigen Zusammenhänge der Psychoakustik aufgeführt.

2.1 Schalldruck, Schallpegel, Pegelrechnung

Die grundlegende Frage, wie Schall als physikalisches Phänomen beschrieben werden kann, ist im Rahmen dieses Buchs nicht vertiefend zu beantworten. Hierzu sind allgemeine Definitionen und Ableitungen in der entsprechenden Fachliteratur zu den Grundlagen der Akustik [119, 127, 140, 151] oder auch der Hydrodynamik als Teilgebiet der Physik, beispielsweise in [124], zu finden.

Sehr allgemein kann Schall rein physikalisch als eine Schwingung in einem elastischen Medium beschrieben werden. Ein elastisches Medium kann ein Fluid wie Wasser oder Luft oder auch ein fester Körper wie Metall, Holz oder Stein sein. Für die Raumakustik ist die Ausbreitung von Schwingungen in Luft von Bedeutung; entsprechend wird von Luftschall gesprochen. Die teilweise wesentlich komplexeren Phänomene des Körperschalls können für die Raumakustik in diesem Zusammenhang unerwähnt bleiben.

Die Anregung der Luftschwingung kann durch eine schwingende Membran eines Lautsprechers, schwingende Saiten wie bei vielen Musikinstrumenten, die schwingenden Stimmbänder des Menschen oder auch durch andere Anregungsformen erfolgen. All diesen Anregungen ist gemeinsam, dass dem vorhandenen Luftdruck eine winzige Änderung überlagert wird. Der Luftdruck ändert sich lokal, d. h. die Luftmoleküle in einem kleinen Volumenelement werden an bestimmten Orten verdichtet. Die lokale Zunahme des Drucks bzw. der Dichte führt zwangsläufig dazu, dass sich in den dazwischen liegenden Bereichen der Druck bzw. die Dichte verringert (siehe Abbildung 2.1). Luftdruckschwankung und Dichteschwankung können in der Akustik als gleichwertig betrachtet werden. Gebiete mit niedrigem Druck entsprechen dann einer geringeren Dichte; hoher lokaler Luftdruck einer höheren lokalen Dichte. Üblicherweise erfolgt die Beschreibung von Luftschall mit Hilfe des (Schall-) Drucks.

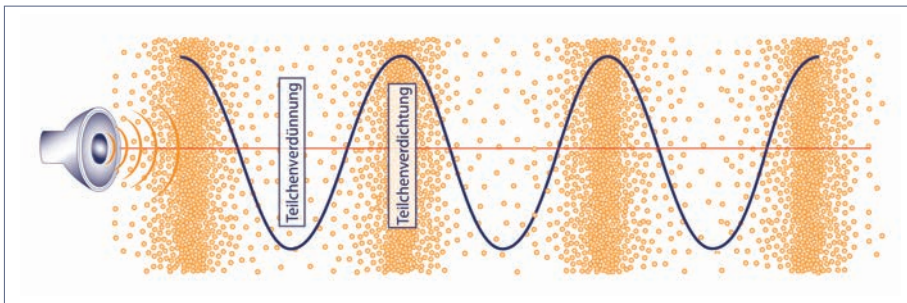


Abbildung 2.1 Schall als lokale Änderung der Luftdichte bzw. des Luftdrucks

Der Schalldruck wird in der Akustik mit dem kleinen Buchstaben p abgekürzt. Die Schwingung in der Luft, d. h. die lokale Verdichtung und Verdünnung gegenüber dem statischen Luftdruck, wird als Schallwelle bezeichnet. Der statische Luftdruck liegt typischerweise bei etwa 100 000 Pa bzw. 1 bar. Je nach Wetterlage ändert sich auch der statische Luftdruck in der Atmosphäre. Die Druckänderung, die als Schall bezeichnet wird, ist im Vergleich dazu um viele Größenordnungen geringer.

Bei vielen Anwendungen in der Akustik wird idealisiert davon ausgegangen, dass die lokale Änderung des Luftdrucks an einem Punkt im Raum ausgelöst wird. Man spricht entsprechend von Punktschallquellen. Die Verdichtung der

Luftteilchen bzw. die lokale Erhöhung und Absenkung des Luftdrucks verläuft in diesem Fall radial von der Quelle weg in alle Raumrichtungen. Punktschallquellen, die in alle Richtungen gleichmäßig Schall abstrahlen, werden auch als Kugelschallquellen bezeichnet. Man kann sich eine Art atmende Kugel vorstellen, die die kleinen Druckschwankungen auslöst. In Abbildung 2.2 ist die radiale Ausbreitung symbolisch dargestellt.

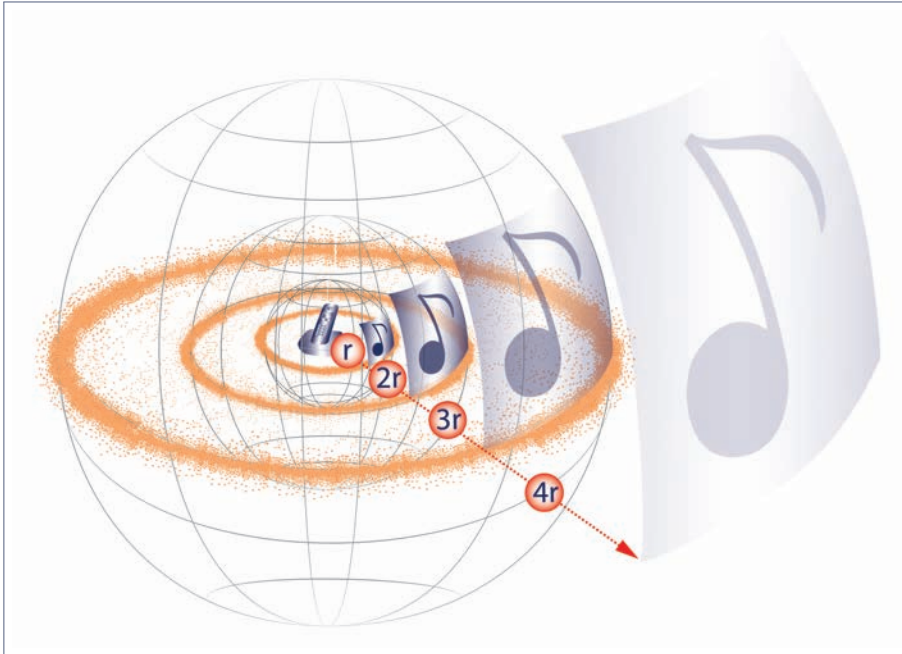


Abbildung 2.2 Kugelförmige Schallausbreitung von einer Punktschallquelle

Betrachtet man die Schalldruckänderung einer Kugelschallquelle in einem größeren Abstand, so ist die Krümmung der Kugeloberfläche zu vernachlässigen. In diesem Bereich, auch akustisches Fernfeld genannt, können die Bereiche der Verdichtung und Verdünnung als nahezu plan-parallele Flächen angenähert werden. In diesem Fall spricht man von »ebenen Schallwellen«.

In der Akustik wird im Allgemeinen nicht der Schalldruck p , die lokale Luftdruckänderung, als Kenngröße zur Beschreibung des Schalls oder auch seiner Stärke direkt verwendet. Die für Luftschall auftretenden Druckänderun-

gen bzw. Schalldrücke umfassen typischerweise einen äußerst großen Wertebereich. Das menschliche Ohr kann bereits Druckänderungen oder Schalldrücke von $0,000002 \text{ Pa} = 2 \times 10^{-5} \text{ Pa} = 20 \mu\text{Pa}$ wahrnehmen. Schalldrücke von 10 Pa und mehr können schon bei kurzzeitiger Einwirkung zu Schädigungen des Gehörs führen. Das menschliche Ohr ist somit ein extrem empfindliches Organ, das zum einen sehr kleine Druckänderungen detektieren und zugleich einen äußerst großen Wertebereich des Drucks, auch als Dynamikbereich bezeichnet, erfassen kann.

Weitere Grundlagen zur Definition des Schalldrucks und anderer Größen wie Schallschnelle, Schallintensität etc. zur Beschreibung von Schallwellen sind der entsprechenden Fachliteratur zur Vertiefung zu entnehmen, siehe hierzu [18, 127, 141, 151, 154].

Wie bereits erwähnt, umfasst die menschliche Wahrnehmung des Schalldrucks einen sehr großen Wertebereich. Um hier nun mit einer praktikableren und besser handhabbaren Skala zu arbeiten, wurde in der Akustik das Dezibel, kurz dB, als relative Kenngröße eingeführt. Der Schalldruck wird hierbei auf einen Bezugswert bezogen und dann als Schalldruckpegel L in dB bezeichnet. Der Bezugswert p_0 entspricht in etwa dem minimal vom Menschen wahrnehmbaren Schalldruck.

Die Definition des Schalldruckpegels L_p ist gegeben durch

$$L_p = 10 \log \left(\frac{p}{p_0} \right)^2 \text{ dB} = 20 \log \frac{p}{p_0} \text{ dB} \quad 2.1$$

mit dem Bezugswert oder Referenzschalldruck $p_0 = 20 \mu\text{Pa}$. Die Umrechnung zwischen Schalldruckpegel L und Schalldruck p erfolgt durch die Umstellung der Gleichung 2.1:

$$p = p_0 10^{L_p/20} \quad 2.2$$

Durch die in Gleichung 2.1 eingeführte Definition des Schalldruckpegels L_p wird durch den Bezugswert p_0 , der ungefähr dem minimal vom Menschen wahrnehmbaren Schalldruck entspricht, ein Bezug zur Wahrnehmung durch den Menschen hergestellt.

Der Schalldruckpegel bezieht sich in der Regel auf eine feste Position im Raum. Möchte man eine Schallquelle anhand des Schalldruckpegels L_p beschreiben, ist es immer notwendig, die Position bzw. den Abstand zur Quelle

anzugeben. Streng genommen müsste auch noch die Abstrahlcharakteristik der Schallquelle beachtet werden. Unter der Annahme einer kugelförmig abstrahlenden Schallquelle kann aus dem Schalldruck in einem bestimmten Abstand zur Schallquelle auch die von der Schallquelle abgestrahlte Schallleistung L_w berechnet werden. Rein mathematisch erfolgt dies durch die Summation bzw. Integration des Schalldrucks auf eine Kugeloberfläche um die Schallquelle herum. Es ergibt sich dann zwischen dem Schallleistungspegel L_w einer Schallquelle und dem Schalldruckpegel L_p einer kugelförmig abstrahlenden Schallquelle im Abstand r bei freier Ausbreitung der folgende Zusammenhang:

$$L_p = L_w - 20 \log r - 11 \text{ dB} \quad 2.3$$

Diese Gleichung wird auch als Abstandsgesetz oder auch $\frac{1}{r}$ -Gesetz der freien Schallausbreitung bezeichnet. Im Rest des Buchs wird lediglich der Begriff Schallpegel verwendet und bezieht sich dann immer auf Schalldruckpegel.

Eine Kugelschallquelle mit einer Schallleistung von $L_w = 75 \text{ dB}$ erzeugt in einem Abstand von 1 m einen Schalldruckpegel von $L_p = 64 \text{ dB}$, von 2 m einen Schalldruckpegel von $L_p = 58 \text{ dB}$ und in einem Abstand von 4 m entsprechend $L_p = 52 \text{ dB}$. Dies setzt freie und ungestörte Schallausbreitung voraus.

Wie anhand von Gleichung 2.3 erkennbar ist, nimmt der Schallpegel einer Kugelschallquelle um 6 dB bei Verdopplung des Abstands ab. Für Schallquellen mit anderen Richtcharakteristiken, wie beispielsweise die Abstrahlung einer Flächenquelle oder einer Linienquelle, gelten andere Abminderungen des Schalls bei Zunahme des Abstands. In der Raumakustik ist es allerdings in der Regel ausreichend, von Kugelschallquellen auszugehen. Andere Richtcharakteristiken werden bei der Planung von elektroakustischen Anlagen gezielt eingesetzt.

Auch in anderen Teilgebieten der Akustik, wie der Bauakustik oder dem Schallimmissionsschutz, sind Kennwerte mit einer Angabe in Dezibel gebräuchlich. Das Schalldämm-Maß in dB oder auch der Schallleistungspegel einer Schallquelle in dB sind Beispiele, die im Rahmen dieses Buchs nicht weiter aufgegriffen und benötigt werden. All diesen Dezibel-Angaben ist gemeinsam, dass immer auf einen Bezugswert verwiesen wird und es sich um relative Größen handelt. Das Dezibel ist keine physikalische Einheit wie der Meter oder das Kilogramm, sondern gibt das Verhältnis zu einem Referenzwert an.

Die räumliche Ausbreitung der Schallwelle erfolgt in Luft mit einer Geschwindigkeit von ca. 343 m/s oder 1200 km/h. Allgemein ist die Schallausbreitungsgeschwindigkeit, oder kurz die Schallgeschwindigkeit c , vom Material bzw. Medium abhängig. In Tabelle 2.1 sind die Schallgeschwindigkeiten für verschiedene Materialien exemplarisch aufgeführt. Die Schallgeschwindigkeit weiterer Materialien ist in der Fachliteratur [89, 99, 154] zu finden.

Material	Schallgeschwindigkeit c
Luft	343 m/s
Stickstoff	346 m/s
Helium	1 005 m/s
Wasser	1 492 m/s
Stahl	5 029 m/s
Blei	1 200 m/s
Quarzglas	5 370 m/s
Beton	3 231 m/s
Holz (Tanne)	5 260 m/s

Tabelle 2.1 Schallgeschwindigkeit bei 20°C in verschiedenen Materialien

Die Schallgeschwindigkeit c in Luft ändert sich in Abhängigkeit von der Temperatur. Die Temperaturabhängigkeit der Schallgeschwindigkeit kann mit Hilfe der folgenden Formel berechnet werden:

$$c = (331 + 0,6 \vartheta) \text{ m/s} \quad 2.4$$

In dieser Formel wird die Lufttemperatur ϑ in °C eingesetzt. Bei 20°C ergibt sich demnach der in Tabelle 2.1 aufgeführte Wert von $c = 343 \text{ m/s}$, bei 30°C entsprechend $c = 349 \text{ m/s}$ und bei 0°C dann $c = 331 \text{ m/s}$. Die Schallgeschwindigkeit in Luft ändert sich somit um 0,6 m/s pro Temperaturänderung von 1°C. In der Raumakustik kann bei üblichen Raumgrößen und Temperaturschwankungen die temperaturabhängige Änderung der Schallgeschwindigkeit in der Regel vernachlässigt werden. Erst bei größeren Volumina oder aber bei höheren Ansprüchen an die Mess- oder Prognosegenauigkeit sollte der Effekt berücksichtigt werden.

Neben der Temperatur beeinflusst auch die Luftfeuchte die Schallausbreitung. Genauso wie bei der Schallausbreitung im Freien bei größeren Distanzen die atmosphärische Dämpfung zu berücksichtigen ist, wird dieser Effekt in Räumen auch erst bei größeren Raumvolumina und hohen Frequenzen wichtig.

Die DIN EN 12354-6 [61] enthält hierzu Angaben zur Dämpfung in Abhängigkeit von Temperatur und Luftfeuchte, die aus dem Bereich der Schallausbreitung im Freien abgeleitet wurden. Diese Werte sind im Abschnitt 6.2 zur Berechnung der Nachhallzeit dargestellt.

Prinzipiell breitet sich Schall stets in alle Raumrichtungen aus. Die Abstrahlung eines menschlichen Sprechers kann näherungsweise als Kugelschallquelle beschrieben werden. Eine genauere Beschreibung der Schallabstrahlung eines Menschen wird in der Regel erst dann notwendig, wenn spezielle Effekte untersucht werden sollen, die in Forschungszusammenhängen oder in Bezug auf Musik eine Rolle spielen. Hinsichtlich der Schallabstrahlung von Singstimmen und auch Musikinstrumenten sei auf das umfassende Werk von Meyer [142] verwiesen. Für die in diesem Buch behandelten Räume des Alltags genügt es davon auszugehen, dass Schallquellen kugelförmig abstrahlen. Ebenfalls ausreichend ist es anzunehmen, dass die Empfänger des Schalls eine kugelförmige Empfangs-Richtcharakteristik aufweisen.

Mit speziellen Lautsprechern bzw. Lautsprecherkombinationen lassen sich im Zusammenspiel mit einer entsprechenden Ansteuerung sehr eng begrenzte Abstrahlrichtungen des Schalls von einer Schallquelle erzeugen, sodass der abgestrahlte Schall gezielt auf bestimmte Positionen gerichtet werden kann. Dies spielt zum Beispiel bei der elektroakustischen Ausstattung von Vortragsräumen eine Rolle. Hier ist zu beachten, dass die Schallenergie mit der Entfernung von der Schallquelle deutlich abnehmen kann, in Zuhörerbereichen allerdings eine möglichst gleichmäßige Schallverteilung herrschen sollte. Die Fragestellungen in Zusammenhang mit der Beschallung von Räumen werden im Rahmen der Elektroakustik behandelt. Ebenso sind Mikrofone mit speziellen Richtcharakteristiken vorhanden, die ebenfalls eine räumlich sehr gerichtete Aufnahme bestimmter Schallereignisse ermöglichen. Spezielle Hinweise zu elektroakustischen Konzepten und Planungen sind in diesem Buch nicht aufgeführt, es wird auf die entsprechende Fachliteratur wie die Bücher von Ahnert [3, 4] oder von Weinzierl [199] verwiesen. Eine hilfreiche Übersicht liefert die Publikation der Schweizerischen Gesellschaft für Akustik [175] »Beschallungsanlagen für Sprache«.

Aus der logarithmischen Definition der Dezibelskala ergeben sich besondere Regeln beim Rechnen mit Schallpegeln, die der einschlägigen Fachliteratur im Detail zu entnehmen sind [18, 151]. Die Addition von Schallpegeln basiert auf der Addition der zugehörigen Schalldrücke, d. h. zunächst wird aus dem Schallpegel der Schalldruck nach Gleichung 2.2 berechnet. Anschließend werden die Schalldrücke addiert und der damit bestimmte Gesamt-Schalldruck wieder in einen Gesamt-Schallpegel L_{ges} umgerechnet. Für die Addition gilt somit:

$$L_{\text{ges}} = 10 \log \sum_{j=1}^n 10^{L_j/10} \text{ dB} \quad 2.5$$

Hierbei kann jeder der n Schallpegel L_j einen anderen Wert haben. Für den Gesamtpegel von n gleichen Schallpegeln L_i lässt sich die Vereinfachung der Berechnung wie folgt angeben:

$$L_{\text{ges}} \approx L_i + 10 \log n \text{ dB} \quad 2.6$$



Bei zwei gleichen Pegeln, d. h. $n = 2$, ergibt sich hieraus unmittelbar, dass die Summe zweier gleich lauter Schallquellen um $10 \log 2 \text{ dB} = 3 \text{ dB}$ höher ist als der Ausgangspegel. Bei gleichen Schallpegeln, wie sie bei identischen Geräten oder Schallquellen vorhanden sind, lässt sich neben der Zunahme um 3 dB bei einer Verdopplung der Anzahl der Geräte auch festhalten, dass es bei einer Verzehnfachung zu einer Zunahme um 10 dB kommt. Im Hinblick auf die Wirkung von Lärm entspricht eine Zunahme um 10 dB einer Verdopplung der Lautstärkewahrnehmung, siehe hierzu Abschnitt 2.3 zur Wahrnehmung von Schall. Auch im Hinblick auf die Pegelminderung durch abschirmende Elemente sind diese Pegeländerungen zu Vergleichszwecken hilfreich.



Differenz zwischen den Pegeln	Pegelzunahme (zum höheren Pegel addieren)
0 dB bis 1 dB	+3 dB
2 dB bis 3 dB	+2 dB
4 dB bis 9 dB	+1 dB
10 dB und mehr	+0 dB

Tabelle 2.2 Merkregel zur Addition von Schallpegeln

Aus der Gleichung 2.5 lassen sich die Gesamtpegel einer beliebigen Anzahl von Schallquellen mit unterschiedlichen Pegeln errechnen. Für überschlägige Abschätzungen zur Addition von Schallpegeln ist die in Tabelle 2.2 dargestellte Merkregel hilfreich, die sich unmittelbar aus Gleichung 2.5 mit $n = 2$ ergibt. Bei einer Differenz von 10 dB oder mehr ist der höhere Pegel so dominant, dass es zu keiner Erhöhung des Gesamtpegels kommt. Die Merkregel erlaubt es ebenfalls, dass überschlägig mehr als zwei Pegel addiert werden, indem schrittweise immer zwei Pegel addiert werden und zu dem Ergebnis dann wiederum der nächste Wert addiert wird. Die Reihenfolge der Addition ist dabei egal.

Drei Maschinen mit Pegeln von 45 dB, 55 dB und 57 dB führen zu einem Gesamt-Pegel von 59 dB. Die Summe aus 55 dB und 57 dB ergibt nach der Merkregel einen Wert von 59 dB; da der dritte Pegel dann mehr als 10 dB Differenz aufweist, folgt keine weitere Zunahme.

2.2 Frequenz, Tonhöhe, Wellenlänge

Die räumliche Ausbreitung von Schallwellen führt an einem festen Bezugspunkt dazu, dass der Schalldruck zeitlich variiert, siehe Abbildung 2.3. Die Anzahl der Schwingungen pro Sekunde wird als Frequenz f bezeichnet. Die physikalische Einheit der Frequenz ist das Hertz, abgekürzt 1 Hz. Ein Schallereignis mit einer Frequenz von 1000 Hz bzw. 1 kHz zeigt an einem festen Ort somit pro Sekunde 1000 Luftdruckwechsel auf, die je nach Amplitude der Auslenkung, also dem Schalldruck oder auch Schallpegel in dB, unterschiedlich stark sein können.

In der Abbildung 2.3 ist die räumlich auftretende Zu- und Abnahme der Dichte bzw. des Luftdrucks dargestellt. Wie beim Zeitsignal an einem festen Ort zeigt sich auch in der räumlichen Ausbreitung eine Periodizität. Die räumliche Wiederholung wird durch die Wellenlänge λ beschrieben.

Für den in der Raumakustik auftretenden Luftschall besteht ein fester Zusammenhang zwischen der Frequenz f , der Wellenlänge λ und der Schallgeschwindigkeit c . Es gilt:

$$c = \lambda \times f \quad 2.7$$

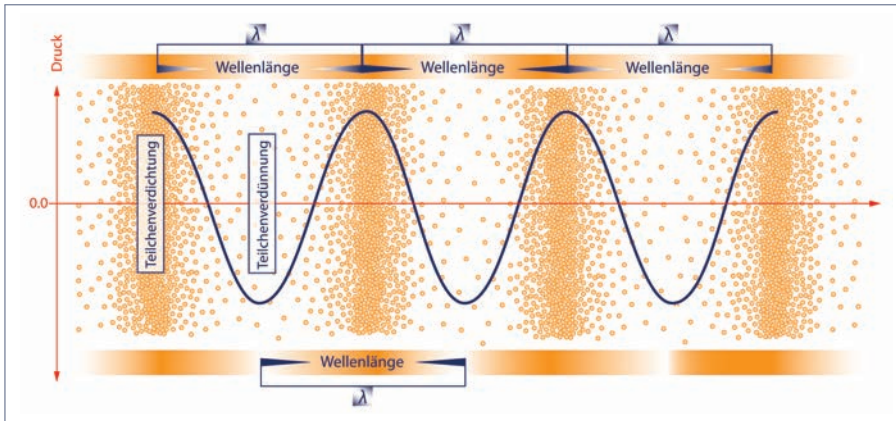


Abbildung 2.3 Schall als lokale Änderung der Luftdichte bzw. des Luftdrucks. Die Wellenlänge λ beschreibt die Periodizität der Wellenausbreitung im Raum.

Zu jeder Frequenz f des Luftschalls kann mit Gleichung 2.7 die Wellenlänge λ berechnet werden. Während bei tiefen Frequenzen die Wellenlängen im Bereich von einigen Metern liegen, beträgt die Wellenlänge bei höheren Frequenzen wenige Zentimeter, siehe Abbildung 2.4. Für die raumakustische Gestaltung von Räumen, wie auch die Dimensionierung von schallabsorbierenden, schallschirmenden oder auch schallreflektierenden Aufbauten, ist der große Wellenlängenbereich von besonderer Bedeutung, da die Größenordnung der Wellenlängen tiefer Frequenzen im Bereich der geometrischen Abmessungen von Räumen und deren Einrichtung liegt.

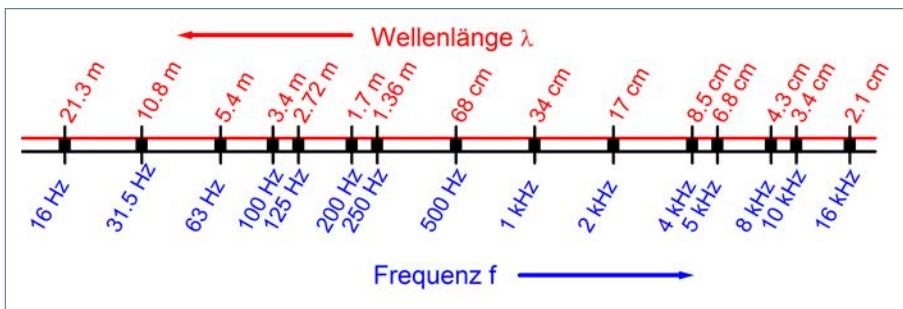


Abbildung 2.4 Frequenz f und Wellenlänge λ von Luftschallwellen nach Gleichung 2.7

Raumakustische Vorgänge oder Phänomene sind grundsätzlich immer in Abhängigkeit von der Frequenz zu betrachten, da sowohl die Abmessungen als auch die Oberflächen von Elementen in einem Raum die Schallausbreitung je nach Wellenlänge bzw. Frequenz in unterschiedlicher Weise beeinflussen.

Ein Schallabsorber, der für hohe Frequenzen, also kurze Wellenlängen, sehr wirksam ist, zeigt mitunter für tiefe Frequenzen keinerlei Absorptionswirkung.

Die Frequenz eines Schallereignisses wird vom Menschen als Tonhöhe empfunden. Der Mensch kann Frequenzen von ca. 16 Hz bis ca. 20 000 Hz wahrnehmen. Dieser Frequenzbereich wird als Hörbereich bezeichnet. Beachtlich ist das Verhältnis von unterer zu oberer Grenze von mehr als 1 : 1 000. Es ist anzumerken, dass eine altersbedingte Abnahme der oberen Frequenzgrenze zu beobachten ist, die allerdings individuell recht unterschiedlich ausfallen kann. Sehr vielschichtig, auch hinsichtlich der Frequenzwahrnehmung, sind krankheitsbedingte oder anders ausgelöste Hörstörungen.



Schallereignisse unterhalb des Hörbereichs, unter 16 Hz, werden als Infraschall und oberhalb von 16 000 Hz = 16 kHz als Ultraschall bezeichnet [43]. In den Bereich des Infraschalls fallen auch Erschütterungen und Vibrationswahrnehmungen. Im Ultraschallbereich wird auch von Hyperschall gesprochen.

Musik umfasst in der Regel einen ähnlichen Frequenzbereich wie der Hörbereich. Menschliche Stimmen können bei sehr tiefen Stimmlagen unter 100 Hz beginnen und erreichen auf der anderen Seite Frequenzanteile bis zu 8 000 Hz.

In der Raumakustik der Alltagsräume wird in der Regel der Teil des Hörbereichs abgedeckt, der sich auf Sprache bzw. Kommunikation bezieht. Technisch wird der Frequenzbereich von 100 Hz bis 5 000 Hz betrachtet, der je nach Erfordernis auch größer gewählt werden kann. Damit ist der für die menschliche Sprach-Kommunikation wichtige Bereich von 200 Hz bis 2 000 Hz (in Terzbandbreite bzw. 250 Hz bis 2 000 Hz in Oktaven) abgedeckt. Die stärksten Frequenzanteile gesprochener Sprache liegen zwischen 300 Hz und 500 Hz [126]. Die verschiedenen Frequenzbereiche sind in der Abbildung 2.5 vergleichend dargestellt.

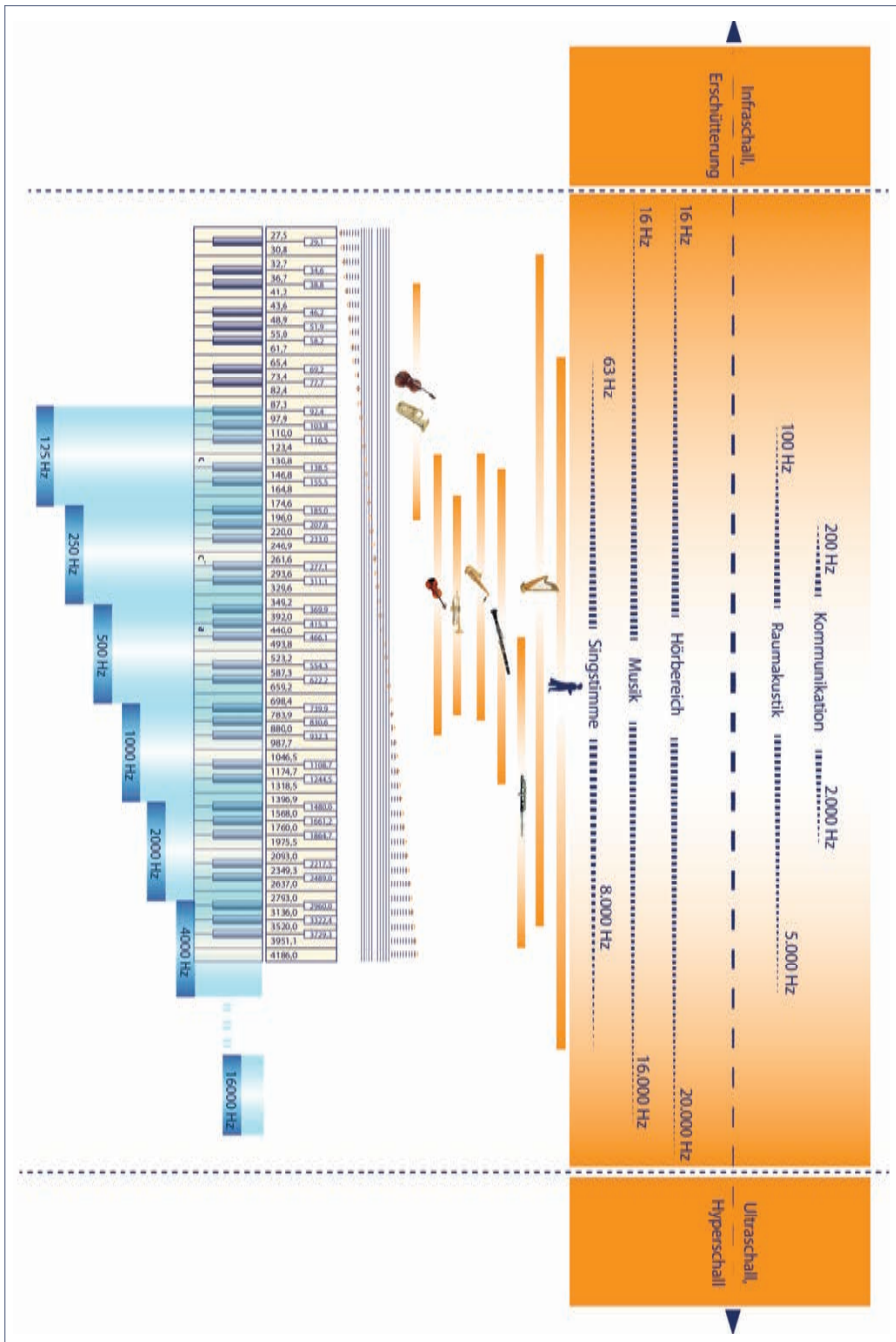


Abbildung 2.5 Beispiele für Frequenzen und Frequenzbereiche

Ton temperierte Stimmung	Terzen			A-Bew. Δ_n	Oktaven		
	f_u	f_m	f_o		f_u	f_m	f_o
	14,1	16	17,8	-56,7	11	16	22
	17,8	20	22,4	-50,5			
	22,4	25	28,2	-44,7			
C ₁ (33 Hz)	28,2	31,5	35,5	-39,4	22	31,5	44
	35,5	40	44,7	-34,6			
	44,7	50	56,2	-30,2			
C (65 Hz)	56,2	63	70,7	-26,2	44	63	88
	70,7	80	89,1	-22,5			
	89,1	100	112	-19,1			
c (131 Hz)	112	125	141	-16,1	88	125	177
	141	160	178	-13,4			
	178	200	224	-10,9			
c ¹ (262 Hz)	224	250	282	-8,6	177	250	255
	282	315	355	-6,6			
	355	400	447	-4,8			
c ² (523 Hz)	447	500	562	-3,2	355	500	710
	562	630	708	-1,9			
	708	800	891	-0,9			
c ³ (1047 Hz)	891	1000	1122	0,0	710	1000	1420
	1122	1250	1413	0,6			
	1413	1600	1778	1,0			
c ⁴ (2093 Hz)	1778	2000	2239	1,2	1420	2000	2840
	2239	2500	2818	1,2			
	2818	3150	3548	1,2			
c ² (4186 Hz)	3548	4000	4467	1,0	2840	4000	5680
	4467	5000	5623	0,5			
	5623	6300	7079	-0,1			
	7079	8000	8913	-1,1	5680	8000	11360
	8913	10000	11220	-2,5			
	11220	12500	14130	-4,3			
	14130	16000	17780	-6,6	11360	16000	22720
	17780	20000	22390	-9,2			

Tabelle 2.3 Mittenfrequenzen f_m für Terzen und Oktaven mit unterer und oberer Frequenzgrenze f_u und f_o in Hz sowie Abschwächung Δ_n in dB für A-Bewertung nach [63]

Analog den Grundbegriffen in der Musik wird auch in der Akustik bei der Beschreibung verschiedener Frequenzbereiche eine Unterteilung in Oktaven und Terzen verwendet. Wie in der Musik entspricht die Oktave dabei einer Verdopplung bzw. Halbierung der Frequenz entsprechend einem Verhältnis von 1 : 2. Eine Terz in der Akustik entspricht einem Frequenzverhältnis von 4 : 5, was in der Musik auch als »große« Terz bezeichnet wird.

Für Frequenzanalysen wurde mit der DIN EN ISO 266 [76] eine Festlegung von Norm-Frequenzen getroffen, die jeweils die Mittenfrequenz des entsprechenden Intervalls definieren. Ausgehend von 1 000 Hz ergibt sich dann die Folge der Oktav-Mittenfrequenzen oder auch Terz-Mittenfrequenzen. Das Frequenzintervall wird umgangssprachlich vereinfachend als Oktave bezeichnet, d. h. mit dem Begriff »1 kHz-Oktave« ist das Oktav-Intervall der 1 kHz-Oktav-Mittenfrequenz gemeint.

In Tabelle 2.3 sind die Terzen und Oktaven von 16 Hz bis 20 000 Hz jeweils mit der zugehörigen Frequenzuntergrenze f_u und -obergrenze f_o angeführt. Weiterhin sind einige musikalische Töne und deren Grundfrequenz angegeben. Während in der Musik ausgehend vom Kammerton a^1 eine Oktave für die weit verbreitete temperierte Stimmung in zwölf gleich große Intervalle unterteilt wird, verwendet die technische Akustik nach DIN EN ISO 266 [76] die Referenzfrequenz 1 000 Hz. Durch diese verschiedenen Bezugsfrequenzen in der Musik und in der Technik kommt es zu einer Verschiebung der beiden Frequenzskalen gegeneinander.



Ebenso große Bedeutung wie der Schallpegel hat auch die Frequenzzusammensetzung des Schalls: kurz das Spektrum. Schall mit nur einer Frequenz wird als reiner Ton bezeichnet. Das Zeitsignal hat einen sinusförmigen Verlauf. Im Spektrum zeigt sich demnach nur eine einzelne Linie bei der Frequenz des Tons. Die Amplitude oder auch Auslenkung des Sinus-Signals im Zeitbereich wird im Spektrum durch die Höhe der Spektrallinie gekennzeichnet. Die beiden Darstellungen im Zeitbereich oder Frequenzbereich des Schallereignisses sind somit gleichwertig. Zeitsignal und zugehöriges Spektrum für einen Sinuston sind skizzenhaft in Abbildung 2.6 dargestellt.



Ein Klang umfasst mehrere Frequenzen, die zueinander in einem festen Bezug stehen, meist Vielfache der niedrigsten Frequenz sind. Es zeigen sich dann entsprechend im Spektrum eines solchen Schalls mehrere Frequenzen. An der

Stärke der Frequenzlinien zueinander kann erkannt werden, wo der stärkste tonale Anteil liegt. Im Zeitbereich kann, wenn nur wenige Frequenzen den Klang ausmachen, mitunter noch die Frequenzzusammensetzung erkannt werden. Beliebige Schallereignisse, auch Geräusche genannt, umfassen in der Regel viele Frequenzen, die nicht in einem bestimmten Verhältnis zueinander stehen. Die Frequenzanalyse von Schallereignissen erfolgt durch eine frequenz-

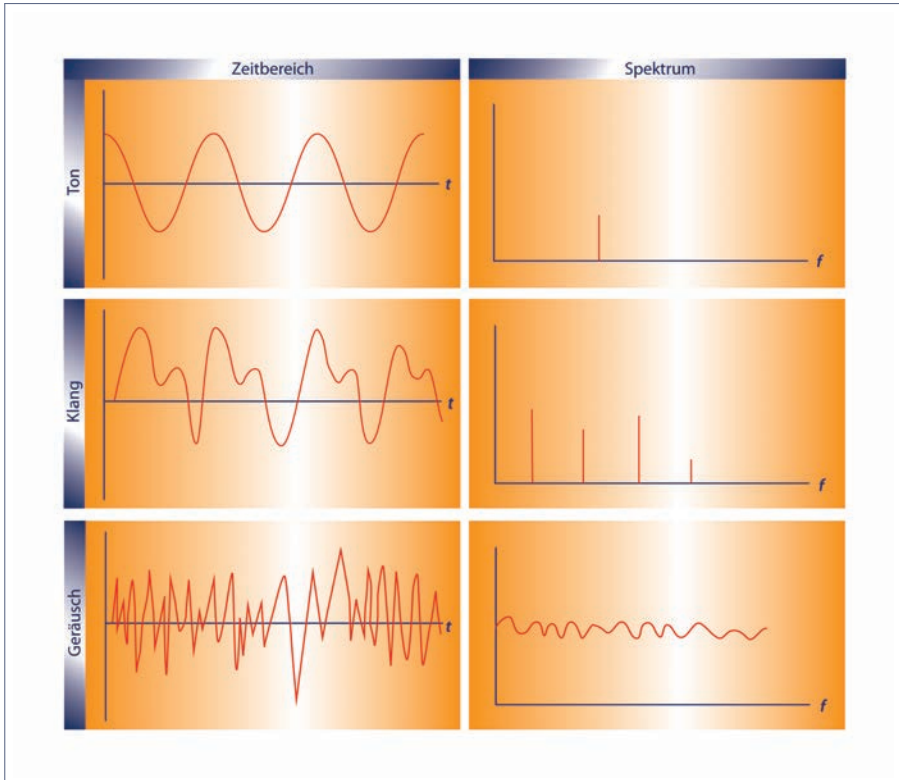


Abbildung 2.6 Schematische Darstellung eines Tons, eines Klangs und eines Geräusches jeweils im Zeitbereich (links) und im Frequenzbereich (rechts)

selektive Filterung der Signale. Moderne Methoden der Frequenzanalyse arbeiten digital und nutzen die Technik der Fast-Fourier-Transformation (kurz: FFT-Analyse) [127, 152]. Es würde den Umfang dieses Buches sprengen, auf die rasante Entwicklung der technischen Möglichkeiten akustischer Messungen und auch der weiteren Signalverarbeitung einzugehen.

In Abbildung 2.7 ist das Spektrum eines Geräusches in Terz- und Oktavbandbreite dargestellt. Prinzipiell kann aus einem Terz-Spektrum durch Mittelwertbildung, hier der energetischen Addition, von drei Terzen das Oktav-Spektrum abgeleitet werden. Andersherum ist dies nicht möglich, da aus der größeren Frequenzauflösung nicht auf die feinere Unterteilung in Terzen geschlossen werden kann.

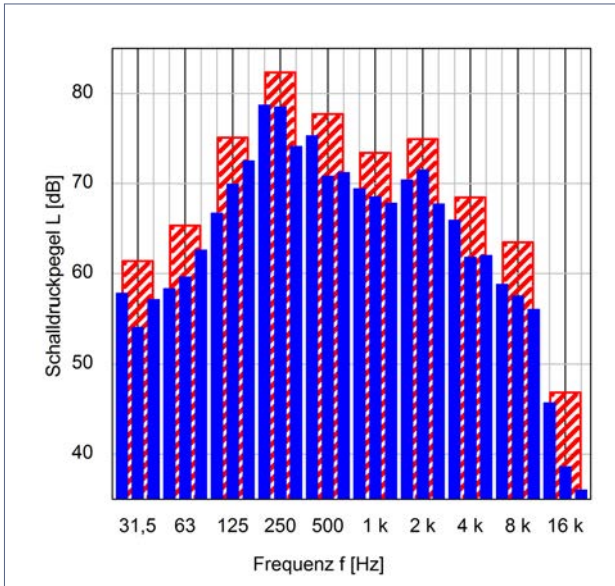


Abbildung 2.7 Oktavspektrum (rot gestrichelt) und Terzspektrum (blaue Balken) eines Geräusches im Vergleich

Sprache kann aus schalltechnischer Sicht als zeitlich stark fluktuierendes und damit nicht-stationäres Schallsignal mit variabler Frequenzzusammensetzung aufgefasst werden. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass das Maximum gesprochener Sprache, gemessen in Terzbandbreite, bei 300 Hz bis 500 Hz liegt. Unterschiede bestehen zwischen Männern und Frauen und auch bei der Sprechweise. Die Grundfrequenz der Sprache männlicher Sprecher liegt bei einer Frequenz von 125 Hz und bei weiblichen Sprecherinnen um eine Oktave höher bei 250 Hz. Eine Änderung der Sprechweise zeigt sich mitunter auch im Spektrum. Zahlreiche weitere Einflüsse auf das Sprachspektrum sind im Buch von Lazarus und Kollegen [126] dargestellt.

2.3 Wahrnehmung von Schall

Die Wahrnehmung von Schall wird durch viele, teilweise auch subjektive Faktoren beeinflusst. Neben der rein physiologischen Verarbeitung von Schallsignalen spielen auch psychologische Aspekte eine Rolle bei der Schallwahrnehmung. Entsprechend kann auch von dem Teilgebiet der physiologischen Akustik oder auch von der psychologischen Akustik, kurz Psychoakustik, gesprochen werden. Die Physiologie des Hörens kann hier nicht aufgeführt und diskutiert werden, sondern es muss auf medizinische Fachliteratur verwiesen werden, in der die grundlegenden Wirkmechanismen und Abläufe des menschlichen Hörens beschrieben werden. Die Hörakustik kann als Teil der medizinischen Physik des Hörens angesehen werden. Neben dem Verständnis des Hörvorgangs beschäftigt sich diese Disziplin auch mit Hörstörungen und deren Kompensation, sei es durch Hörgeräte oder andere Hilfen. Im Bereich der Psychoakustik ist auf grundlegende Bücher zu verweisen: »Das Ohr als Nachrichtenempfänger« [207] von Zwicker/Feldtkeller, »Schall aus psychologischer Sicht« [167] und »Akustik zwischen Physik und Psychologie« [168] von Schick, »Psychoacoustics« [86] von Fastl/Zwicker oder »Lauter Schall« [100] von Hellbrück/Guski.

Die für die Raumakustik im Alltag wichtigen Aspekte der psychologischen Akustik werden im Folgenden kurz beschrieben, wobei diese Aufzählung keinen Anspruch auf Vollständigkeit erhebt.

Lautstärke – Schallpegel

Schon die Definition des Dezibels zeigt durch den gewählten Referenzschalldruck den Bezug zum Hören des Menschen auf. Das menschliche Gehör zeigt darüber hinaus eine ausgeprägte Frequenzabhängigkeit der Lautstärkewahrnehmung innerhalb des Hörbereichs. Zwischen 250 Hz und 2000 Hz in Oktavbandbreite, dem Frequenzbereich der menschlichen Sprache, ist das menschliche Gehör besonders empfindlich. Dies ist einerseits sinnvoll, wenn wir einem Sprecher zuhören wollen, andererseits sind Störungen in diesem Frequenzbereich auch besonders lästig und können die Kommunikation stark beeinträchtigen. Bei hohen und tiefen Frequenzen nimmt die Hörfähigkeit ab.

In Abbildung 2.8 sind sogenannte Isophone, d. h. Kurven gleicher Lautstärkepegel nach DIN ISO 226 [73], dargestellt. Es ist beispielsweise ablesbar, dass ein Ton mit 100 Hz ca. 25 dB laut sein muss, um wahrgenommen zu werden, bei 1 000 Hz reicht dagegen ein 5 dB lauter Ton, um gehört zu werden. Neben der Hörschwelle sind für verschiedene Pegelwerte ausgehend von 1 000 Hz die Kurven gleicher Lautstärkewahrnehmung dargestellt. Die oberste Kurve in der folgenden Abbildung kennzeichnet den Verlauf der sogenannten »Schmerzschwelle« in Abhängigkeit von der Frequenz. Bei derart hohen Pegeln kann das Gehör bereits durch ein sehr kurzes Geräuschereignis, z. B. durch einen wenigen Millisekunden dauernden Knall, nachhaltig geschädigt werden.

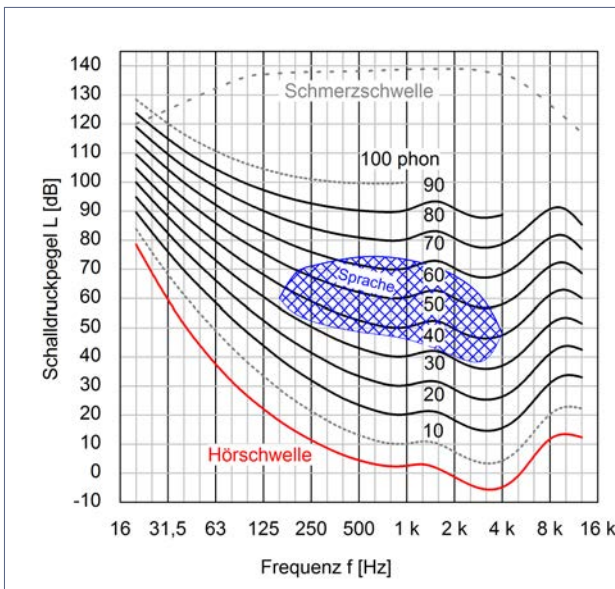


Abbildung 2.8 Isophone: Normalkurven gleicher Lautstärkepegel für reine Töne im freien Schallfeld nach DIN ISO 226 [73] sowie der Bereich von Sprache nach Zwicker/Feldtkeller [207]

Neben den Isophonen ist in Abbildung 2.8 die klassische Darstellung der Hörfläche nach Zwicker/Feldtkeller [207] eingetragen. Sprache umfasst demnach einen Frequenzbereich von ca. 170 Hz bis 3 000 Hz, in Oktaven von 250 Hz bis 2 000 Hz und einen Dynamikbereich von ca. 40 dB bis 70 dB.

Für eine Lautstärkebewertung von Geräuschen, die dem menschlichen Gehör gerecht wird, ist die Frequenzcharakteristik des menschlichen Gehörs zu berücksichtigen. Die mittleren Frequenzen, bei denen das menschliche Gehör besonders empfindlich ist, werden bei der Bildung eines Summenpegels aus dem

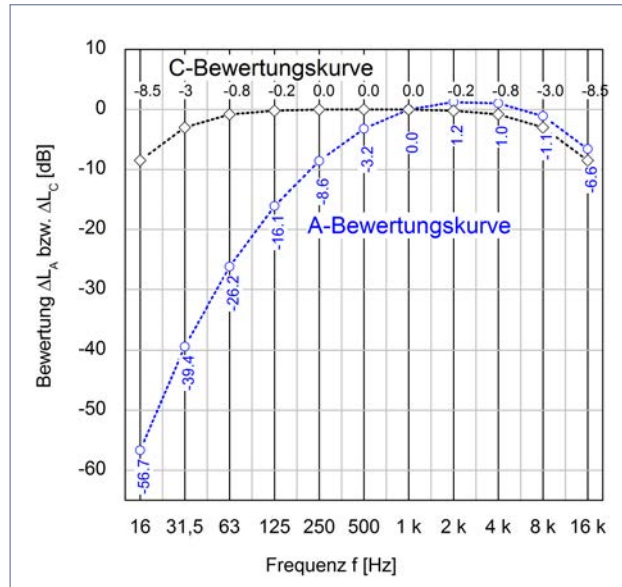


Abbildung 2.9 C- und A-Bewertungskurven zur Bildung des Summenpegels nach [63]

Spektrum stärker berücksichtigt als die hohen und tiefen Frequenzen. Diese Wichtung führt zu der Bezeichnung dB(A) für Schallpegel, dem sogenannten A-bewerteten Schallpegel. Nahezu sämtliche Vorschriften, Richtlinien, Richtwerte, Grenzwerte, Empfehlungen und Hinweise zu Schallpegeln geben Werte in dB(A) an. Eine andere Bewertung, die in einigen technischen Regelwerken Erwähnung findet, ist die C-Bewertung. In Abbildung 2.9 sind die Bewertungskurven grafisch dargestellt und die Oktav-Werte zur A-Bewertung bzw. C-Bewertung nach DIN EN 626172-1 [63] aufgeführt.

Bei der Darstellung von Spektren ist darauf zu achten, ob schon eine Bewertung berücksichtigt wurde oder nicht. Abbildung 2.10 zeigt das gleiche Spektrum in linearer und A-bewerteter Form. Die Differenz entspricht der Angabe Δ_n zur A-Bewertung aus Tabelle 2.3.

In Abbildung 2.11 sind Beispiele für typische A-bewertete Schallpegel dargestellt. Häufig wird statt der eigentlich korrekten Bezeichnung dB(A) verkürzt die Bezeichnung dB verwendet, auch wenn eigentlich ein A-bewerteter Pegel gemeint ist. In der Regel ergibt es sich aus dem Zusammenhang, wenn einmal nicht A-bewertete Schallpegel gemeint sind. In diesem Sinne wird auch

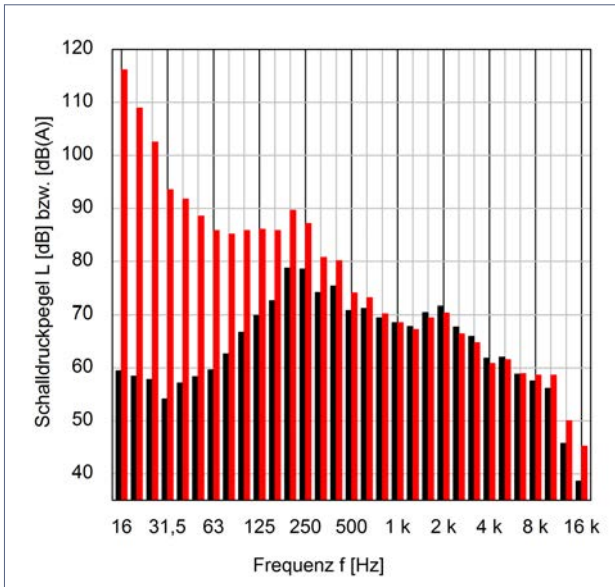


Abbildung 2.10 Linear (rot) und A-bewertetes (schwarz) Terzspektrum eines Geräusches

im Rest des Buches generell die Bezeichnung dB verwendet. Die Verwendung der A-Bewertung ist immer sinnvoll, wenn es um die Wahrnehmung und Bewertung von Schallereignissen durch Menschen geht, wie beispielsweise im Arbeitsschutz oder auch dem Schallimmissionsschutz.

Wie bereits erläutert (Abschnitt 2.1) ist zu beachten, dass eine Verdopplung der Schallquellen (Zunahme um 3 dB) nicht zu einer Verdopplung der Lautstärkewahrnehmung führt. Wie bei vielen Wahrnehmungen des Menschen ist zwischen der physikalischen Größe, hier dem Schallpegel, und der Empfindungsgröße, hier der subjektiv empfundenen Lautstärke oder kurz der Lautheit, zu unterscheiden.

Wenn zwei Schallquellen mit einer Lautstärke von jeweils 60 dB einwirken, führt dies nach den Regeln zur Addition von Schallpegeln zu einem Wert der Gesamtlautstärke von 63 dB. Eine Zunahme von 3 dB wird vom Menschen in der Regel gerade eben wahrgenommen. Eine doppelt so starke bzw. halb so schwache Lautstärke-Empfindung wird von den meisten Menschen erst bei einer Zu- bzw. Abnahme des Schallpegels um 10 dB beschrieben.

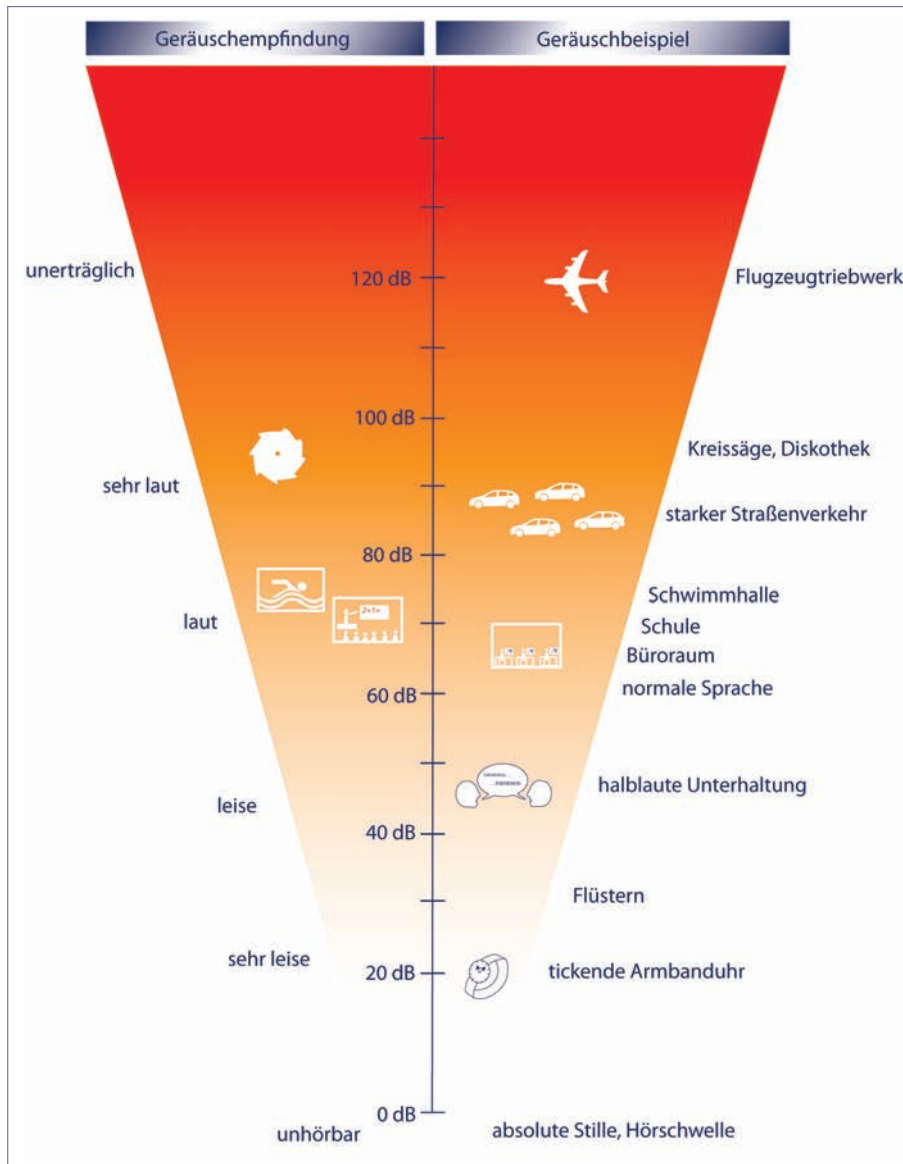


Abbildung 2.11 Beispiele für typische A-bewertete Schalldruckpegel und die zugehörige subjektive Empfindung der Lautstärke

Die Wahrnehmung der Lautstärke hängt mitunter nicht nur vom physikalischen Schallpegel ab, sondern kann auch durch andere Faktoren beeinflusst werden. Mit derartigen Wechselwirkungen und der eigentlichen Empfindung der subjektiven Wahrnehmung beschäftigt sich das Teilgebiet der Psychoakustik [167, 168].

Verstehbare Sprache kann eine wesentlich größere Störf Wirkung erzeugen als nicht-verstehbare Sprache.

Zur Beschreibung der subjektiv empfundenen Lautstärke ist in der Psychoakustik die Empfindungsgröße Lautheit N gebräuchlich. Die Einheit der Lautheit ist sone. Einem Lautstärkepegel von 40 phon entspricht die Lautheit von 1 sone. Bei einer Frequenz von 1 kHz ist der Zahlenwert des Lautstärkepegels in phon und der des Schallpegels in dB gleich. Für die anderen Frequenzen kann die Differenz zwischen phon und dB aus der Abbildung 2.8 abgelesen bzw. nach den Vorgaben der DIN ISO 226 [73] berechnet werden. Aus dem Spektrum eines Schallereignisses, beispielsweise in Oktavbandbreite in dB angegeben, lässt sich damit zunächst der phon-Wert und damit dann auch der sone-Wert bestimmen. Die Erhöhung der Lautheit um 1 sone bedeutet stets eine Verdopplung des Lautstärkeindrucks. Da sich die Definition der Lautheit N auf die 40 phon-Kurve bezieht, kann überschlägig davon ausgegangen werden, dass bei Schalldrücken von mehr als 40 dB eine Zunahme um 10 dB mit einer Verdopplung der empfundenen Lautstärke einhergeht. Unterhalb von 40 dB wird die Empfindung bereits bei geringeren dB-Differenzen halbiert bzw. verdoppelt. Dieser Hinweis auf die Lautheit N in sone soll aufzeigen, dass auch in der Raumakustik durchaus eine Betrachtung auf subjektiver Ebene wichtig sein kann. Zumindest die Geräuschangaben zu technischen Geräten werden teilweise in der Einheit sone angegeben.

In sehr stark abgeschirmten, also hoch schallgedämmten Räumen mit niedrigen Schallpegeln, kann der Mensch Unterschiede von ca. 1 dB wahrnehmen. Diese Wahrnehmbarkeitsschwelle wird auch mit JND (engl.: »Just Noticable Difference«) bezeichnet. Wie an den Isophonen der Abbildung 2.8 erkennbar ist, ist die Unterscheidungsgrenze streng genommen wiederum abhängig von der Frequenz. Die Angabe einer JND von ca. 1 dB ist daher als Näherungswert anzusehen, gilt allerdings in einem weiten Pegelbereich [127]. 1 dB entspricht einer Schallpegeländerung von etwa 12%.

Tonhöhe – Frequenz

Wie die Wahrnehmung des Schallpegels als Lautstärke bestimmten Gesetzen folgt, gilt dies auch für die Frequenz. Die Frequenz wird als Tonhöhe empfunden. Die Wahrnehmbarkeitsschwelle (engl: JND) der Frequenz liegt bei Menschen für reine Töne unterhalb von 500 Hz bei ca. 3,5 Hz und wird bei höheren Frequenzen größer. Bezogen auf den absoluten Wert der Frequenz bedeutet dies, dass die wahrnehmbare Frequenzänderung unterhalb von 500 Hz zwischen 0,7% und 6% liegt und oberhalb von 500 Hz bei 0,7%. Die Frequenzauflösung ist zudem noch von der Lautstärke abhängig. Bei Pegeln unter 30 dB nimmt das Auflösungsvermögen wiederum deutlich ab. Bei breitbandigeren Geräuschen ergeben sich andere Zusammenhänge, die wiederum der Spezialliteratur vorbehalten bleiben. Ein grundlegendes Werk hierzu ist das Buch »Das Ohr als Nachrichtenempfänger« von Zwicker/Feldtkeller [207] oder auch das Buch von Fastl [86].

Zudem ist die Wahrnehmung des Gehörs von der Dauer der Schalleinwirkung abhängig. Als Grenzdauern des Gehörs können die Werte von 2 ms, 20 ms und 200 ms beschrieben werden. Schallereignisse von weniger als 2 ms kann das Gehör nicht analysieren. Bei Schallereignissen mit mehr als 200 ms Dauer beginnt die bekannte Hörfähigkeit. Zwischen 2 ms und 20 ms erfolgt die Wahrnehmung mit einer noch nicht vollständigen Empfindung der Lautstärke. Zwischen 20 ms und 200 ms erfolgt eine pegelabhängige Wahrnehmung. Im Folgenden werden diese grundlegenden Eigenschaften des menschlichen Gehörs nicht weiter berücksichtigt, da sie für die Wahrnehmung in Räumen des Alltags nur eine untergeordnete Rolle spielen. Große Anwendung finden diese Eigenschaften des Gehörs hingegen im Bereich der Audiotechnik, beispielsweise bei der Kompression von Schallsignalen in Formaten für Audio-CDs oder dem bekannten Audio-Format MP3.

Zeitliche Auflösung

Viele Richt-, Grenz- und Orientierungswerte, aber auch Empfehlungen und Anforderungen beziehen sich auf zeitliche Mittelwerte des Schallpegels. Der Mensch hört allerdings weder Mittelwerte, die wie im Bereich des Schallimmissionsschutzes häufig über mehrere Stunden zu mitteln sind, noch ist das Ohr in der Wahrnehmung beliebig schnell. Das Ohr besitzt eine Trägheit von

im Mittel ungefähr 35 ms, d.h. Schallereignisse, die mit weniger als dieser zeitlichen Abfolge das Ohr erreichen, können nicht einzeln wahrgenommen werden.

Diese Eigenschaft des menschlichen Gehörs hat in der akustischen Messtechnik dazu geführt, dass verschiedene Zeitbewertungen zur Analyse von Schallsignalen verwendet werden. Am häufigsten ist die sogenannte Fast-Bewertung anzutreffen. Hierbei werden mit einem 125 ms-langen Filter immer entsprechende Zeitabschnitte zusammengefasst und quasi als Mittelwert betrachtet. Andere Zeitbewertungen in der akustischen Messtechnik sind die »Slow«- und die »Impulse«-Bewertung. Auch hierzu wird auf die entsprechende Literatur zur Vertiefung verwiesen [154, 152].

Für die Raumakustik stellt die zeitliche Trägheit des Ohres eine Einschränkung dar bzw. sie ist als Grundlage für die akustische Gestaltung von Räumen zu beachten. Typischerweise kann das menschliche Ohr zwei Schallereignisse erst auflösen, wenn dazwischen eine Zeitspanne von 35 ms bis 50 ms liegt. Mit Kenntnis der Schallgeschwindigkeit ($c = 343\text{m/s}$) lassen sich diese Zeitdauern in Entfernungen umrechnen (siehe Abbildung 2.12).

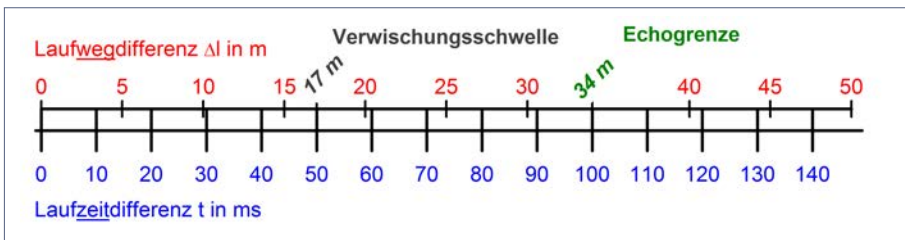


Abbildung 2.12 Laufweg- und zugehörige Laufzeitdifferenz mit Darstellung der Verwischungsschwelle und der Echogrenze

Als Verwischungsschwelle bezeichnet man in der Raumakustik den Abstand bzw. die Zeitdifferenz zwischen dem ersten eintreffenden Schall und der ersten eintreffenden Reflexion, die gerade eben als störend wahrgenommen wird. Auch wenn hier individuell eine recht große Streuung zu beobachten ist, wird als sicherer Wert in der Raumakustik die Zeitdauer von ungefähr 50 ms entsprechend einer Weglänge von circa 17 m angenommen.

Bei längeren Laufzeitdifferenzen zwischen direktem und erstem reflektierten Schall kommt es spätestens ab 100 ms zur Wahrnehmung einzelner Schallergebnisse, die dann als Echos beschrieben werden. Dieser Wert von 100 ms ist ebenfalls als grober Orientierungswert aufzufassen; er entspricht einer Laufwegdifferenz von 34 m. Die hier angegebene Verwischungs- und Echoschwelle bezieht sich auf die Wahrnehmung von Sprache. Für Musik sind diese Zeit- oder auch Laufwegdifferenzen eher länger und zeigen eine Abhängigkeit von der Art der Musik. Bestimmte Musikarten leben geradezu vom Echo, während andere nur wenig Nachklängen vertragen.

Aus der Schallgeschwindigkeit von 340 m/s folgt, dass in 50 ms der Schall einen Weg von 17 m durchlaufen hat. Dieser Effekt kann im Selbstversuch beobachtet werden, wenn man sich 5 m vor eine gut reflektierende Wand begibt und in die Hände klatscht. Die Reflexion erreicht den Klatschenden nach 2×5 m, entsprechend 34 ms. Eine Reflexion bzw. ein Echo ist nicht wahrnehmbar. Sobald der Hin- und Rückweg des Schalls mehr als ca. 17 m beträgt (das entspricht einem Abstand von der Wand von 8,5 m), d. h. länger als 50 ms ist, wird der Rückwurf bzw. die Reflexion wahrnehmbar.

In Bezug auf die raumakustische Gestaltung ist auf diese Wahrnehmbarkeitsschwelle einzelner zeitverzögerter und entsprechend starker Reflexionen einzugehen. Ganz allgemein kann angemerkt werden, dass, je größer der Raum, desto wichtiger die Berücksichtigung einzelner Schallrückwürfe wird.

Richtungshören

Die bisherigen Ausführungen und zitierten Messgrößen bezogen sich durchgehend auf die Messung oder Wahrnehmung an einem Punkt. Die auditive Wahrnehmung des Menschen verlässt sich jedoch in der Regel auf beide Ohren, wobei das zweite Ohr nicht nur die Rolle eines redundanten Zweit-Systems übernimmt, sondern weit darüber hinaus geht. Viele Aspekte des menschlichen Hörens gehen auf die grundlegende Möglichkeit des beidohrigen, also binauralen Hörens zurück. Der Mensch kann bereits eine Richtungsänderung von 3° in der horizontalen Ebene des Kopfes wahrnehmen [127, 140]. In der vertikalen Ebene ist die Auflösung geringer, wobei hier weitere Eigenschaften wie das Spektrum des Schalls zur Ortung genutzt werden. Das gesamte Richtungshören und die damit erst mögliche Orientierung im dreidimensionalen Raum würden mit nur einem Empfänger-Organ nicht funktionieren. Das binaurale Hören wie auch die räumliche Wahrnehmung sind ein seit längerer

Zeit bearbeitetes Forschungsgebiet, beschränkt sich allerdings in der praktischen Anwendung bislang weitgehend auf den Bereich der Musik. Während es im Bereich der Musik und Musikwahrnehmung anerkannte und zur Planung und auch Messung verwendete binaurale raumakustische Kenngrößen zur Beschreibung entsprechender Raumeigenschaften gibt, ist dieser wichtige Aspekt der menschlichen Hörwahrnehmung in Räumen des Alltags bestenfalls als vernachlässigt, wenn nicht gar als völlig unbeachtet zu beschreiben.

2.4 Bewertung von Schall

Eine objektive Bewertung von Schallereignissen dient in der Regel dem Vergleich mit Anforderungen, Vereinbarungen, Empfehlungen oder rechtlichen Vorgaben. Für die Raumakustik im Alltag sind hier vornehmlich arbeitsschutzrechtliche Belange zu beachten. Im Bereich des Arbeitsschutzes wird meist auf die Einwirkung von Schall über einen Zeitraum von acht Stunden als Dauer eines typischen Arbeitstages Bezug genommen. Die Stärke des einwirkenden Schalls sowie dessen Dauer führen zu einer Betrachtung der Schalldosis. Eine lange Einwirkung eines niedrigen Pegels wird damit gleichgesetzt mit der kurzen Einwirkung eines hohen Pegels. Inwieweit diese Bewertungsgrundlage, die ebenfalls in anderen Bereichen der Akustik, wie im Schallimmissionschutz, zur Anwendung gelangt, noch als zeitgemäß angesehen werden kann und der tatsächlichen Lärmwirkung entspricht, kann im Rahmen dieses Buches nicht geklärt werden. Autoren wie Schick [168, 170] und andere [110, 126, 152] gehen hierauf vertiefend und umfassend ein. Eine übersichtliche Darstellung zur Schall- und Lärmwirkung im Büroumfeld geben Meis/Klink mit der Fachschrift Nr. 11 des Industrieverbands Büro und Arbeitswelt e.V. (IBA) [139].

Prinzipiell ist zwischen den auralen und extraauralen Wirkungen von Schall zu unterscheiden. Aurale Wirkungen des Lärms sind direkt schädigend für das Gehör und treten bei Schallpegelwerten von 80 dB oder mehr auf. Extraaurale Wirkungen sind schon ab 30 dB zu verzeichnen. Hierzu zählen oftmals psychische oder kognitive Beeinträchtigungen, die teilweise nur sehr langfristig zu beobachten sind. Zu den verschiedenen Wirkungen zeigt die Abbildung 2.13 (aus [139]) einige Beispiele. Weitere Informationen sind in den Tagungsbänden zu zwei Symposien [159, 170] zu finden.

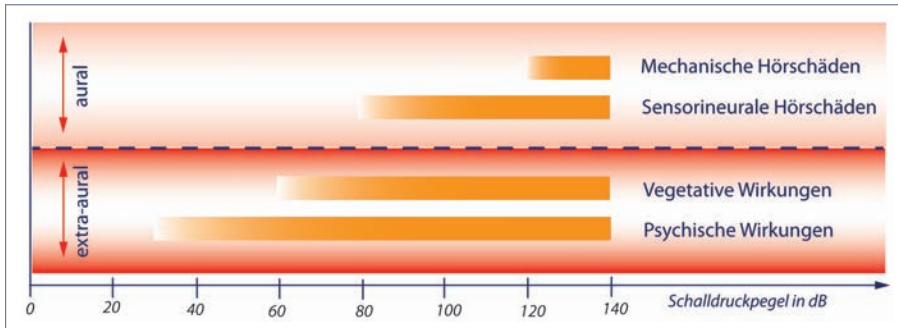


Abbildung 2.13 Aurale und extraaurale Wirkungen von Lärm (nach [139])

Im Folgenden werden die für den Bereich des Arbeitsschutzes in Räumen des Alltagslebens wichtigen Begriffe beschrieben. Der Schutz von Arbeitnehmern gegen Lärm am Arbeitsplatz wird in verschiedenen Regelwerken thematisiert. Neben der Arbeitsstättenverordnung [10] ist die Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung [121] zu beachten. Die zugehörigen Technischen Regeln zur Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung konkretisieren deren Anwendung. Neben einem allgemeinen Teil [183] werden in drei weiteren Teilen Hinweise zur Beurteilung der Gefährdung [184], der Messung von Lärm [185] sowie Lärmschutzmaßnahmen [186] angeführt. Im allgemeinen Teil wird allerdings darauf hingewiesen, dass sogenannte extraaurale Wirkungen von Lärm, d. h. im Bereich unterhalb eines äquivalenten Dauerschallpegels von 80 dB, nicht Gegenstand dieser Regeln sind. Auch die Wirkungen von Infraschall (unter 16 Hz) und Ultraschall (über 16 kHz) werden ebenso wie der Musik- und Unterhaltungssektor vom Anwendungsbereich ausgenommen. Im privaten Bereich wie im Bildungssektor bestehen hiernach keine differenzierten Anforderungen.

Im Bereich des Arbeitsschutzes [186] sind die folgenden Grundsätze anzuwenden: »Die aufgrund der Gefährdungsbeurteilung bei Lärmexpositionen festgelegten Schutzmaßnahmen sind nach dem Stand der Technik durchzuführen, um die Gefährdung der Beschäftigten auszuschließen oder so weit wie möglich zu verringern. Dabei muss die Lärmemission am Entstehungsort verhindert oder so weit wie möglich verringert werden. Technische Schutzmaßnahmen haben Vorrang vor organisatorischen Schutzmaßnahmen. Technische oder organisatorische Schutzmaßnahmen haben Vorrang vor individuellen Schutzmaßnahmen (persönlicher Gehörschutz).«

Die Ermittlung der Geräuschimmissionen am Arbeitsplatz erfolgt nach den Vorgaben der DIN EN ISO 9612 »Akustik - Bestimmung der Lärmexposition am Arbeitsplatz« [77]. Diese Norm deckt den Bereich der Gehörgefährdung, also die auralen Wirkungen, ab und beschreibt das messtechnische Vorgehen zur Bestimmung des Tages-Lärmexpositionspegels $L_{EX,8h}$ an Arbeitsplätzen, der wie folgt ermittelt wird:

$$L_{EX,8h} = L_{p,A,eqT_e} + \left[\frac{T_e}{T_0} \right] \text{ dB} \quad 2.8$$

Hierbei ist:

- L_{p,A,eqT_e} der A-bewertete äquivalente Dauerschallpegel über die Zeit T_e
- T_e die tatsächliche Zeitdauer des Arbeitstages, in Stunden
- T_0 die Bezugszeitdauer, $T_0 = 8h$

Für die Räume des alltäglichen Lebens ist dieser Pegelbereich auraler Wirkungen, also oberhalb von 80 dB, nicht von großer Relevanz. Der Tages-Lärmexpositionspegel nach DIN EN ISO 9612, der zur Ermittlung und Bewertung der Gehörgefährdung dient, ist zu unterscheiden vom Beurteilungspegel L_r . Der Beurteilungspegel ist eine Größe zur Kennzeichnung der typischen Schallimmission für eine Tätigkeit. Der Tages-Lärmexpositionspegel kann sich hingegen auf mehrere Tätigkeiten während eines typischen Arbeitstages beziehen. Entsprechend werden in DIN EN ISO 9612 [77] umfangreiche Hinweise gegeben, wie bei unterschiedlichen Tätigkeiten vorzugehen ist. Ebenfalls darin enthalten sind ein Leitfaden zur Auswahl der Messstrategie sowie Hinweise zur Ermittlung von Messunsicherheiten.

Zur Ermittlung von Geräuschimmissionen am Arbeitsplatz für extraaurale Wirkungen, also unterhalb von 80 dB, ist die DIN 45645-2 »Ermittlung von Beurteilungspegeln aus Messungen-Teil 2: Geräuschimmissionen am Arbeitsplatz« [58] im September 2012 veröffentlicht worden. Gegenüber der vorherigen Ausgabe dieser Norm aus dem Jahr 1997 wurde der Anwendungsbereich auf die Beurteilung extraauraler Wirkungen von Geräuschimmissionen bei der Arbeit eingeschränkt. Es besteht somit eine normative Abgrenzung zur Ermittlung von Geräuschen mit auralen (DIN EN ISO 9612) und extraauralen Wirkungen (DIN 45645-2).

Die grundlegende Messgröße ist der zeitabhängige Schallpegel $L_{AF}(t)$. Diese Abkürzung bedeutet, dass mit der A-Frequenzbewertung sowie mit der Zeitbewertung »Fast« zu messen ist. Zielgröße zur Bewertung der Geräusche an einem Arbeitsplatz ist der sogenannte Beurteilungspegel L_T . Der Beurteilungspegel wird nach folgender Gleichung ermittelt:

$$L_T = L_{pAeq} + K_I + K_T \text{ dB} \quad 2.9$$

Hierbei ist:

L_{pAeq}	der äquivalente Dauerschallpegel nach DIN 45641 [57]
K_I	der Impulzzuschlag
K_T	der Zuschlag für Ton- und Informationshaltigkeit

Der äquivalente Dauerschallpegel L_{pAeq} ist der Mittelwert des zeitabhängigen Schalldruckpegels $L_{AF}(t)$. Mittelwertbildende bzw. integrierende Messgeräte zeigen in der Regel diesen Pegel als L_{Aeq} direkt an. Der Impulzzuschlag K_I wird aus der Differenz zwischen dem mit der Impulsbewertung gebildeten Mittelwert L_{AIeq} und dem äquivalenten Dauerschallpegel L_{pAeq} gebildet und dient der Berücksichtigung der Störwirkung von impulshaltigen Geräuschen. Er beträgt maximal 6 dB. Der Zuschlag für Ton- und Informationshaltigkeit K_T ist nach subjektiver Einschätzung des Sachverständigen, der die Messung durchführt, zu vergeben. Je nach Auffälligkeit mindestens eines deutlich hörbaren Einzeltons kann man K_T Werte von 3 dB oder 6 dB annehmen. Auch Geräusche, die in besonderer Weise die Aufmerksamkeit einer Person wecken oder zum Mithören unerwünschter Informationen anregen, sind nach einer Anmerkung der DIN 45645-2 informationshaltig. Die Summe der Zuschläge ist auf 6 dB begrenzt. Hinsichtlich weiterer Details zur Auswertung entsprechen der Messungen wird auf die DIN 45645-2 [58] verwiesen.

Zusammenfassend ist zu erwähnen, dass der Beurteilungspegel eine Art künstlicher Mittelwert ist. Die Messung erfolgt am Arbeitsplatz (ortsbezogen) oder auch an der Person (personenbezogen) und bezieht sich auf die dort einwirkenden Geräusche. Es muss die für den jeweiligen Arbeitsplatz kennzeichnende Geräuschsituation durch die Messung erfasst werden. Dies kann bei stark unterschiedlichen Geräuschsituationen zu recht langen Messdauern führen. Andererseits kann bei sehr gleichförmigen Geräuschen an einem Arbeits-

platz schon durch eine kurze Messdauer der Beurteilungspegel bestimmt werden. Die Messungen können auch personengebunden durchgeführt werden, indem ein Mikrofon am Körper getragen wird. Hinweise und Erläuterungen zur Durchführung der Messung sind ebenfalls in der DIN 45645-2 [58] zu finden und ausführlich im Buch von Maue [133] kommentiert.

Speziell für das Arbeitsumfeld im Büro mit starken eigenen und fremden Kommunikationsanteilen ist der Hinweis der DIN 45645-2 [58] aus dem Jahr 2012 zu den Eigengeräuschen bedenkenswert. Eigengeräusche sind nach den Vorgaben der Norm Geräusche, die in die Bestimmung des Beurteilungspegels nicht eingehen. Explizit genannt in der Norm werden Schall, der durch eigene Gespräche mit anderen Personen entsteht, und Geräusche durch Kommunikationssignale wie Telefon.

Drei Beispiele von typischen Pegel-Zeit-Schrieben $L_{AF}(t)$ sind in Abbildung 2.14 dargestellt. Sofern keine Zuschläge zu vergeben sind, entspricht der äquivalente Dauerschallpegel L_{pAeq} dem Beurteilungspegel L_T . Für die Beispiele wären die Werte von 49,1 dB, 54,9 dB bzw. 87,5 dB mit den entsprechenden Empfehlungen und Hinweisen zu vergleichen.

Die Bewertung der Geräusche am Arbeitsplatz nach VDI 2058, Blatt 3 [189] erfolgt anhand des Beurteilungspegels. Es wird darauf hingewiesen, dass neben diesem Pegel auch die Sprachverständlichkeit, die Signalerkennung, die Lästigkeit und die Störwirkung von Geräuschen die Einschätzung beeinflussen können. Die Auswirkungen von Geräuschbelastungen werden umfassend beschrieben. Neben auralen und extraauralen Wirkungen wird auch die Beeinträchtigung der Arbeitsleistung sowie der Arbeitssicherheit thematisiert.

Zur Beurteilung von Geräuschbelastungen werden drei verschiedene Tätigkeitskategorien verwendet, für die jeweils ein Richtwert für den Beurteilungspegel vorgegeben wird. In Tabelle 2.4 sind die Richtwerte der Tätigkeitskategorien zu den Kategorien zusammengestellt. Die Zuordnung zu den Tätigkeitskategorien wird in der Richtlinie VDI 2058, Blatt 3 anhand von Tätigkeitsmerkmalen und Beispielen vorgeschlagen. Es wird gleichzeitig darauf hingewiesen, dass die Angabe von Beispielen lediglich als Erläuterung zu sehen ist. Tarifrechtliche oder innerbetriebliche Regelungen werden explizit ausgeschlossen.

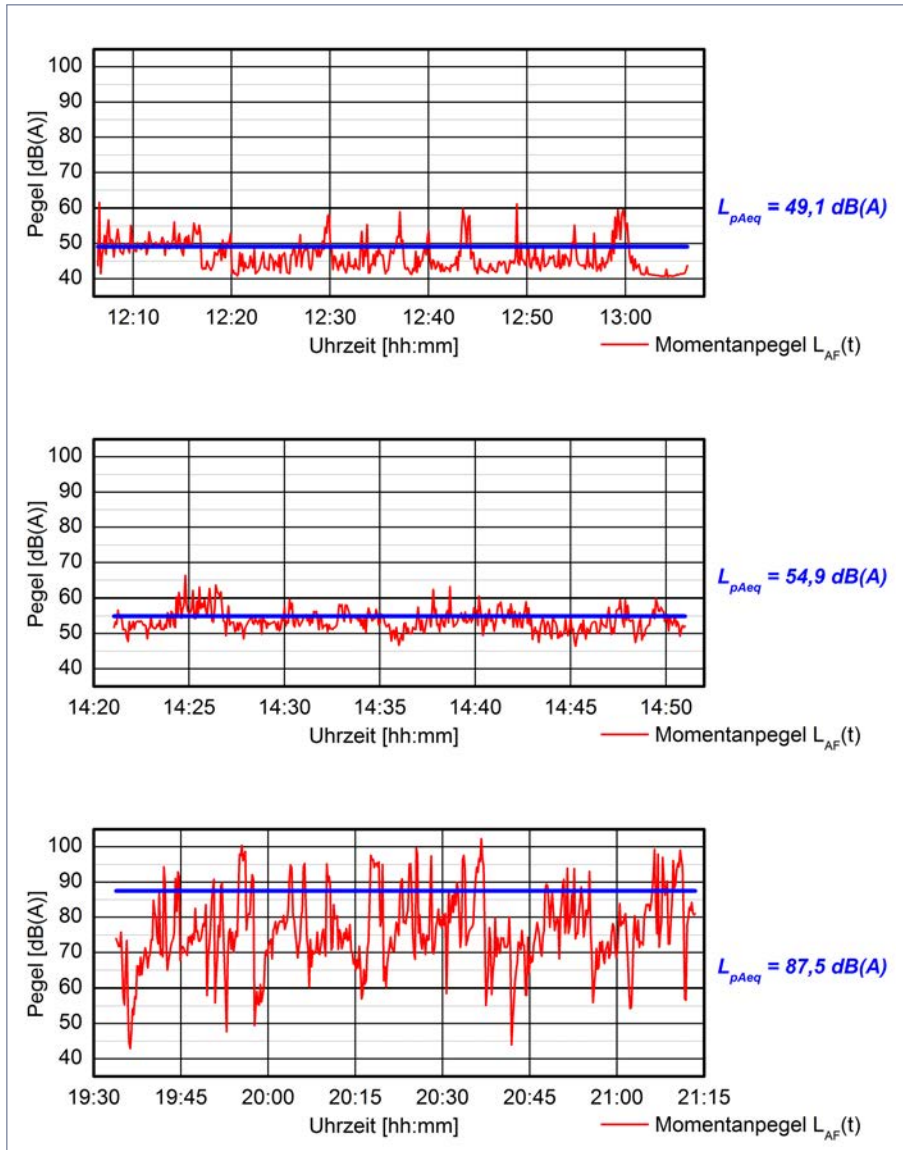


Abbildung 2.14 Pegelschriebe aus einem Großraumbüro (oben), einem Call-Center (Mitte) und einem Orchestergraben (unten) mit Angabe des Mittelungspegels L_{pAeq}

Tätigkeits-kategorie	Richtwert Beurteilungspegel
überwiegend geistige Tätigkeiten	$L_r \leq 55 \text{ dB}$
einfache und eingeübte Bürotätigkeiten und vergleichbare Tätigkeiten	$L_r \leq 70 \text{ dB}$
sonstige Tätigkeiten	$L_r > 70 \text{ dB}$

Tabelle 2.4 Tätigkeitskategorien und zugehörige Richtwerte für den Beurteilungspegel

Details und weitere Informationen zur nicht immer unbedingt eindeutigen Zuordnung zu den Tätigkeitskategorien sind der VDI 2058, Blatt 3 [189] zu entnehmen. Nachfolgend sind die Tätigkeitsmerkmale für die Kategorien aus VDI 2058, Blatt 3 wiedergegeben.

Beurteilungspegel $\leq 55 \text{ dB}$

Der A-bewertete Beurteilungspegel am Arbeitsplatz darf auch unter Berücksichtigung der von außen einwirkenden Geräusche höchstens 55 dB betragen, wenn die zu erbringenden Tätigkeiten überwiegend geistiger Art sind. Geistige Tätigkeiten, die Konzentration (Hemmung ablenkender Reize) und Arbeitsgedächtnis (kurzzeitiges Behalten von Informationen und deren Verknüpfungen) beanspruchen, werden insbesondere dann beeinträchtigt, wenn die Geräusche starke Schwankungen bzw. häufige Unterbrechungen aufweisen oder informationshaltig sind. Dies ist z. B. der Fall, wenn sie sprachliche Informationen enthalten oder Informationen, die als Zustandsveränderungen in der Umgebung interpretiert werden. Geistige Tätigkeiten, die auch optimale Sprachverständlichkeit bei niedrigen Sprachpegeln oder bei einer den normalen Sprecherabstand überschreitenden Entfernung erfordern, werden auch bei stationärem Rauschen beeinträchtigt, da über Maskierung die Sprachverständlichkeit direkt beeinträchtigt wird bzw. durch erhöhte Höranstrengung den geistigen Tätigkeiten kognitive Ressourcen entzogen werden.

Zu beachten ist, dass irrelevante Sprache sowie stakkatohafte Musikstücke im Hintergrund und Geräusche mit häufigen abrupten Unterbrechungen das verbale Arbeitsgedächtnis in jedem Falle, das heißt unabhängig von individuellen Leistungs- und Persönlichkeitsmerkmalen, beeinträchtigen.

Tätigkeiten und Handlungen, die die oben beschriebenen geistigen Anforderungen stellen, finden sich beispielsweise:

- bei der Teilnahme an Besprechungen und Verhandlungen in Konferenzräumen
- beim Arbeiten in Bibliothekslesesälen
- bei Prüfungen unter anderem im schulischen Bereich
- bei Arbeit und Entscheidungsprozessen (gegebenenfalls unter Zeitdruck) in Büros
- bei ärztlichen Untersuchungen, Behandlungen und Eingriffen
- in Kontroll- und Leitwarten bei der Überwachung und Steuerung von Prozessabläufen
- beim Entwerfen, Übersetzen, Diktieren, Aufnehmen und Korrigieren von schwierigen Texten.

Beurteilungspegel 55 dB bis 70 dB

Der A-bewertete Beurteilungspegel am Arbeitsplatz darf auch unter Berücksichtigung der von außen einwirkenden Geräusche höchstens 70 dB betragen, wenn die zu erbringenden Tätigkeiten eine mittlere Beanspruchung nicht übersteigen. Diese ist dann gegeben, wenn die Tätigkeit nicht mit einer andauernd hohen Anspannung der Aufmerksamkeit (Konzentration) verbunden ist. Dies bedeutet, dass für die Erbringung einer guten Arbeitsqualität nach subjektiver Einschätzung ausreichend Zeit zur Verfügung steht. Dies ist in der Regel gewährleistet, wenn die Tätigkeit Routineanteile enthält, das heißt wiederkehrende ähnliche und leicht zu bearbeitende Aufgaben bzw. Arbeitsinhalte. Des Weiteren sind Tätigkeiten mittlerer Beanspruchung nicht durch hohen Entscheidungsdruck und Entscheidungen mit großer Tragweite gekennzeichnet. Für einfache Tätigkeiten, für die das Verstehen gesprochener Sprache entscheidend ist, muss gewährleistet sein, dass irrelevanter Schall auch bei einem A-bewerteten Beurteilungspegel von 70 dB die gesprochene Sprache (Nutzschall) nicht verdeckt, um eine Erhöhung der Fehlerhäufigkeit bzw. vermehrte Höranstrengungen zu vermeiden. Tätigkeiten, bei denen es auf eine gute Sprachverständigung ankommt, erfordern A-bewertete Schallpegel deutlich unter 70 dB. Zum Beispiel ist eine 99%ige Satzverständlichkeit mit Sicherheit nur bei A-bewerteten Schalldruckpegeln von 55 dB und weniger gegeben.

Bei folgenden Tätigkeiten und Praxisbeispielen sollte ein A-bewerteter Beurteilungspegel von 70 dB nicht überschritten werden:

- informations- und kommunikationsgeprägte Tätigkeiten, wie Bedienung und Beratung von Kunden in Kaufhäusern oder ähnlichen Einrichtungen
- psychomotorisch geprägte (feinmotorische) Tätigkeiten (Auge-Hand-Koordination)
- Disponieren, Datenerfassen Textverarbeitung/ Datenverarbeitung
- Arbeiten in Betriebsbüros und Laboratorien
- Kontroll-, Steuerungs- und Überwachungstätigkeiten in Messwarten und Prozessleitwarten
- Verkaufen, Bedienen von Kunden, Tätigkeiten mit Publikumsverkehr
- schwierige Feinmontagearbeiten.

Beurteilungspegel > 70 dB

Tätigkeiten an Arbeitsplätzen, an denen ein A-bewerteter Beurteilungspegel von höchstens 70 dB unter Berücksichtigung zumutbarer betrieblicher Lärm-minderungsmaßnahmen häufig nicht einzuhalten ist, sind z. B.

- handwerkliche Tätigkeiten (Fertigung, Installation)
- Tätigkeiten an Fertigungsmaschinen, Vorrichtungen, Geräten
- Warten, Instandsetzen und Reinigen technischer Einrichtungen und deren unmittelbare Beaufsichtigung
- Bedienen von Bearbeitungsmaschinen für Metall, Holz und dergleichen.

Zu den akustischen Kennwerten für Arbeitsplätze wird unter Ziffer 8 der VDI 2058, Blatt 3 ausgeführt, dass »das akustisch aufeinander abgestimmte Zusammenwirken von Raumgeometrie, -größe und -ausstattung und insbesondere die Nachhallzeit zu beachten (siehe DIN 18041)« sind. Um die Richtwerte für den Beurteilungspegel einzuhalten, ist daher eine entsprechende raumakustische Gestaltung der Räume zwingend erforderlich.

3 Grundlagen der Raumakustik

3.1 Historischer (Literatur-)Rückblick

Viele (Lehr-)Bücher zur Akustik beginnen damit, dass zunächst der griechische Ursprung des Wortes Akustik erklärt wird. Darauf kann hier verzichtet und auf die einschlägigen Werke verwiesen werden [84, 118]. Auch die Ausführungen der griechischen Denker Pythagoras oder Aristoteles oder römischen Gelehrten zeigen zwar die Grundlagen der Akustik auf, haben aber wenig Bezug zur Akustik in Räumen, da sich das Leben im sonnigen Süden sehr viel im Freien abspielte. Die Wechselwirkung zwischen der Lehre des Hörens (der Akustik) und der Kunst des Bauens (der Architektur) wurde historisch gesehen erst später thematisiert.

Vermutlich kann 1898 als wichtiges Jahr der Raumakustik genannt werden, das Jahr in dem Wallace Clement Sabine experimentell die Beziehung zwischen Nachhallzeit, Raumvolumen und Menge an Schallabsorption im Raum empirisch ableitete. Damit waren die Grundzüge der Raumakustik zu Beginn des zwanzigsten Jahrhunderts geschaffen. Die Arbeiten Sabines sind als »Collected Papers on Acoustics« [166] auch heute noch spannend zu lesen.

Die Umsetzung dieser grundlegenden Erkenntnisse scheint gewissen Schwankungen oder gar Hindernissen unterworfen zu sein. Mit Büchern wie dem »Leitfaden der Raumakustik für Architekten« [200] von Weisse aus dem Jahr 1949, dem lesenswerten Werk von Michel [144] zur »Hörsamkeit großer Räume« aus dem Jahr 1921 oder auch dem Buch »Raum- und Bauakustik« von Engl [80] aus dem Jahr 1939 waren Hinweise und Erläuterungen auch für die bautechnische Umsetzung raumakustischer Prinzipien vor langer Zeit mehr als hinreichend dokumentiert. Schon im Jahr 1894 lieferte Sturmhöfel mit seinem Werk »Akustik des Baumeisters« [178] eine Schnittstelle zwischen Architektur und Raumakustik. Hanus nimmt sich mit seinem Werk zum »Einfluss der Raumakustik auf die bauliche Gestaltung« [96] im Jahr 1956 dem Wechselspiel zwischen architektonischer und raumakustischer Gestaltung an.

Furrers »Raum- und Bauakustik für Architekten« (1956) [92] zeigt Möglichkeiten und Wege zur guten Akustik auf. Die »Elementare Raumakustik« von Petzold [162] aus dem Jahre 1927 rundet diese frühen Werke des damals neuen Themas Raumakustik ab.

Nicht nur im deutschsprachigen Raum sind somit in der ersten Hälfte des zwanzigsten Jahrhunderts Voraussetzungen geschaffen worden, um die Akustik eines Raums zu berechnen und zu kontrollieren. Im englischsprachigen Umfeld sind ähnliche Entwicklungen und Tendenzen zu erkennen, siehe hierzu die Werke von Knudsen, »Architectural Acoustics« [114], Morse/Bolt, »Sound Waves in Rooms« [149] oder auch Burris-Meyer/Goodfriend, »Acoustics for the Architect« [23].

Der sehr lesenswerte Band von Cremer zur »Geometrischen Raumakustik« [29] erscheint im Jahr 1948. Die weiteren beiden Bände der ersten Auflage zur »Wellentheoretischen Raumakustik« [30] aus dem Jahr 1950 und zur »Statistischen Raumakustik« [31] im Jahr 1961 zeigen das hohe wissenschaftliche Niveau in Verbindung mit praktischen Hinweisen zur baulichen Umsetzung. Die Fortschreibung dieser drei Bände durch Cremer/Müller mit dem zweibändigen Werk zu den »Wissenschaftlichen Grundlagen der Raumakustik« [32, 33] kann nach wie vor als Standardwerk zu den Grundlagen der Raumakustik gesehen werden.

Eher populärwissenschaftliche Bücher wie »Gute Akustik - aber wie?« von Reichardt [165] zeigten in der zweiten Hälfte des zwanzigsten Jahrhunderts die Möglichkeiten der baulichen Umsetzung angemessener Hör- und Sprechbedingungen auf. Auch die beiden Bände von Hartmann [97, 98] zeigten an vielen praktischen Beispielen die Wege zur »guten Akustik«. Neben den Arbeiten von Cremer in Berlin und Meyer in Göttingen sind die zahlreichen Ausarbeitungen zur Raumakustik von Reichardt in Dresden im Bezug auf die Raumakustik von Alltagsräumen zu benennen. Ein weiteres Standardwerk, dies allerdings zum Schallschutz und zur Raumakustik, ist die »Bau- und raumakustische Entwurfslehre« von Fasold und Kollegen [85]. Nicht nur die Auflage aus dem Jahre 1987, sondern auch das mehrbändige Vorgängerwerk mit einem Einzelband zur Raumakustik [83] sollte die angebrachte Würdigung an dieser Stelle erhalten. Das zweibändige »Taschenbuch der Akustik« [82] enthält ebenfalls zahlreiche Bezüge zur Raumakustik. Hierbei wird nicht nur die

Raumakustik spezieller Räume, wie Konzertsäle oder Opernhäuser, betrachtet, sondern auch die von Arbeitsräumen, Fabrikhallen und anderen Alltagsräumen.

Gerade im Bereich der Räume für Musik existieren umfangreiche Sammlungen von Beispielen und auch Lehrbücher, auf die hier nur am Rande eingegangen werden soll. Das vermeintlich bekannteste Standardwerk zu Konzertsälen und Opernhäusern ist sicherlich das Buch »Concert Halls and Opera Houses« von Beranek [17]. Weitere Vertiefungen des Themas sind in den folgenden Büchern zu finden: Barron, »Auditorium Acoustics and Architectural Design« [14]; Brooks, »Architectural Acoustics« [21]; Cavanaugh, »Architectural Acoustics« [25]; Cowan, »Architectural Acoustics Design Guide« [26]; Egan, »Architectural Acoustics« [79]; Kuttruff, »Room Acoustics« [120]; Mehta, »Architectural Acoustics« [138]; Weinzierl, »Beethovens Konzerträume« [198]. Weiterhin ist das »Architectural Acoustics Handbook« von Xiang [203] zu nennen, das einen Bogen vom Schallschutz über den Schallimmissionsschutz bis hin zur Raumakustik von Opernhäusern aufspannt.

Zur Kirchenakustik sei auf das gleichnamige Werk [143] von Meyer verwiesen. Spezielle Themen aus dem Bereich der Kirchenakustik sind in dem Buch »Orgeln, Kirchen und Akustik« [130, 131] oder auch in dem Werk »Hörsamkeit in Kirchen« [206] aufgeführt. Erwähnenswert ist in diesem Zusammenhang auch die Dissertation von Werner »Einflüsse raumakustischer Faktoren auf das Musikhören in Kirchen« [201]. Spannende Lektüre zur Wahrnehmung von Musik mit vielen verlinkten Hörbeispielen bietet das Buch »Vom Neandertal in die Philharmonie« [5] von Altenmüller.

Spezielle Aspekte der Akustik werden in weiteren Werken zur Raumakustik aufgegriffen. Kleiner [113] geht in dem Werk »Acoustics of Small Rooms« ausführlich auf die Akustik in kleinen Räumen ein und betrachtet hierbei insbesondere die Thematik tiefer Frequenzen. Aspekte der Audiotechnik auch im Hinblick auf akustische Erfordernisse sind von Weinzierl im »Handbuch der Audiotechnik« [199] umfassend dargestellt.

Das Buch »Kreative Raum-Akustik für Architekten und Designer« [171] ist eines der wenigen von einem Architekten erstellten Bücher zur Raumakustik. Ein sehr umfassendes Werk mit zahlreichen Abbildungen verschiedenster Materialien ist das Buch »Sound Materials« [2] von Tyler Adams. Dieses

umfassende Kompendium zeigt anhand zahlreicher Anwendungen eine große Bandbreite technischer Möglichkeiten zur Gestaltung der Raumakustik. Architekturnahe Publikationen und aus akustischer Sicht hervorragende Darstellungen wie von Mommertz, »Akustik und Schallschutz« [148], scheinen nach Ansicht des Autors bislang noch nicht die längst überfällige Öffnung der Architektur bzw. Raumakustik für die Raumakustik bzw. Architektur erbracht zu haben. Architektur und Raumakustik scheinen die Chancen einer gegenseitigen Unterstützung zu meiden. Dies bringt Apfel mit seinem Büchlein »Deaf Architects and Blind Acousticians« [7] sehr schön auf den Punkt. Inwieweit diese Unterschiede der Sichtweise der Akustik und der Hörgewohnheiten der Architektur bei den Räumen des Alltags auch in Zukunft bestehen bleiben, ist abzuwarten.

3.2 Schallausbreitung

Prinzipiell ist bei den schalltechnischen Eigenschaften in einem Gebäude zwischen den Aspekten des Schallimmissionsschutzes, der Bauakustik und der Raumakustik zu unterscheiden. Der Schallimmissionsschutz beschäftigt sich mit den Emissionen aus dem Gebäude heraus sowie mit den Immissionen, die auf das Gebäude einwirken. Vorgaben und Hinweise hierzu werden häufig im Rahmen der Bauleitplanung definiert und sind dann von Beginn der Planungsphase an zu beachten. Aus diesen Vorgaben, wie beispielsweise zum Außenlärm, der auf das Gebäude einwirkt, ergeben sich Anforderungen an den baulichen Schallschutz, die im Rahmen der bauakustischen Planung zu beachten sind. Neben dem Schallschutz gegen Außenlärm wird bei der Bauakustik auch der Schallschutz innerhalb des Gebäudes betrachtet, siehe Abbildung 3.1

Ergänzend zu den baurechtlichen oder auch öffentlich-rechtlichen Vorgaben in Gebäuden mit mehreren Nutzern sind auch zivilrechtliche Vorgaben, Anforderungen oder Empfehlungen zum Schallschutz im eigenen Bereich einer Firma, einer Wohnung etc. zu finden. Entsprechende Fachliteratur zu schalltechnischen und rechtlichen Aspekten des Schallschutzes sind beispielhaft die Bücher von Baumgartner et al., »Mangelhafter Schallschutz von Gebäuden« [15]; Locher-Weiß, »Rechtliche Probleme des Schallschutzes« [129]; Seibel, »Bau-mängel und anerkannte Regeln der Technik« [172, 173]; Ganten/Kindereit,

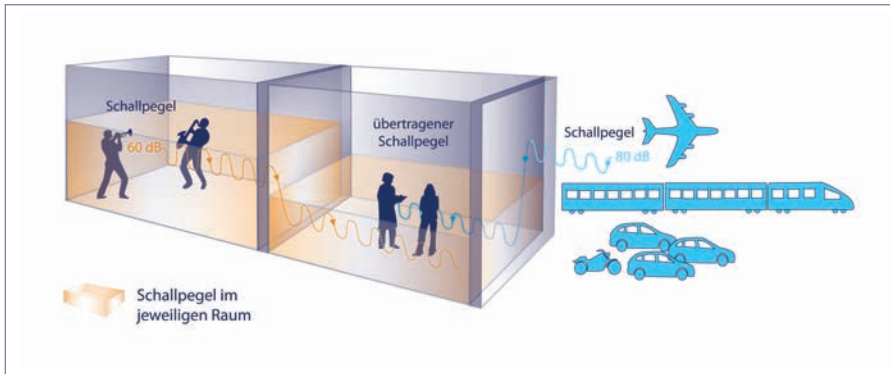


Abbildung 3.1 Die Bauakustik umfasst den Schallschutz innerhalb eines Gebäudes und gegen Außenlärm

»Typische Baumängel« [93]; Müller, »Schallschutz in der Praxis« [153]; An-sorge, »Schallschutz« [6]; Moll, »Schallschutz im Wohnungsbau. Gütekriterien, Möglichkeiten, Konstruktionen« [146]; Boldt/Zöller, »Anerkannte Regeln der Technik - Inhalt eines unbestimmten Rechtsbegriffs« [20] Hettler, »Technische Regelwerke zum Schallschutz« [102]; Fischer/Schneider, »Handbuch zu DIN 4109 - Schallschutz im Hochbau« [87]; und anderen.

Die Raumakustik behandelt die Schallausbreitung in Räumen. Man kann fast geneigt sein zu sagen, dass eine angemessene Raumakustik erst möglich wird, wenn der Schallschutz des Gebäudes ausreichend ist. In einem Raum, der durch unpassende bauakustische Bedingungen als zu laut wahrgenommen wird bzw. über zu hohe Schallpegel verfügt, ist die Beschäftigung mit der Schallausbreitung im Raum wenig zielführend. Es ist eine häufige Fehlvorstellung, dass durch raumakustische Maßnahmen bauakustische Defizite behoben werden können. Schallschutz durch Raumakustik kann nicht funktionieren.

Wer seinen Nachbarn aufgrund mangelhaften Schallschutzes zu stark hört, wird durch raumakustische Maßnahmen kaum eine Verbesserung erreichen.

Bauakustische Voraussetzungen zur Raumakustik

In der später in diesem Buch ausführlich diskutierten DIN 18041 [52] zur Hörsamkeit in Räumen, dem zentralen Regelwerk zur Raumakustik in Räumen des Alltags, werden Hinweise zum baulichen Schallschutz, also zur Bauakustik, angeführt. Hierzu wird der Störschalldruckpegel der bauseitigen Geräusche mit der Bezeichnung $L_{NA, Bau}$ definiert und angewandt. Mit $L_{NA, Bau}$ wird im jeweils betrachteten Raum der Schalldruckpegel beschrieben, der von Außengeräuschen, Geräuschen aus Nachbarräumen, von haustechnischen Anlagen, Sanitärinstallationen und den fest installierten medientechnischen Geräten erzeugt wird. Eine Prognose ist streng genommen nur möglich, wenn Annahmen zu diesen Anteilen der verschiedenen Komponenten getroffen werden. Messtechnisch kann der $L_{NA, Bau}$ im leeren, betriebsfertigen Raum erfasst werden.

Sowohl bei der Prognose als auch bei der Messung sind die folgenden Aspekte zu beachten: Die Pegelanteile der Außengeräusche hängen sowohl von der Geräuschsituation außerhalb des Gebäudes als auch von den bauakustischen Eigenschaften (Schalldämmung) der Gebäudehülle ab. Dies ist auch bei den Geräuschen aus den Nachbarräumen der Fall. Für eine Prognose müssen hier somit Annahmen sowohl zur Stärke der Geräuschquellen außerhalb und innerhalb des Gebäudes als auch zum Schallschutz des Gebäudes getroffen werden. Bei einer Messung ist es in der Regel problematisch, dass in dem Raum zur Messung kein Betrieb herrscht, während im Nachbarraum der typische Betrieb stattfindet.

In der DIN 18041 [52] werden neben dem $L_{NA, Bau}$ noch der Sprachschalldruckpegel L_{SA} , der Gesamtstörschalldruckpegel L_{NA} , der Störschalldruckpegel der Betriebsgeräusche $L_{NA, Betrieb}$ und der Störschalldruckpegel der Publikumsgeräusche $L_{NA, Publ}$ definiert. Für Details dieser Begriffe wird auf den Normtext der DIN 18041 [52] verwiesen.

Störschalldruckpegel der bauseitigen Geräusche	Empfehlung für
$L_{NA, Bau} \leq 30 \text{ dB}$	Räume der Nutzungsart A1
$L_{NA, Bau} \leq 35 \text{ dB}$	Räume der Nutzungsart A2, A3 und A4
$L_{NA, Bau} \leq 40 \text{ dB}$	Räume der Nutzungsart A5

Tabelle 3.1 Empfehlungen für den Störschalldruckpegel bauseitiger Geräusche $L_{NA, Bau}$ nach Anhang B der DIN 18041 [52]

In Tabelle 3.1 sind die Empfehlungen für Störschalldruckpegel $L_{NA,Bau}$ der bauseitigen Geräusche nach Abschnitt B.3 im Anhang B der DIN 18041 [52] angeführt. Die Nutzungsarten A1 bis A5 der DIN 18041 sind in Tabelle 5.1 auf Seite 127 dargestellt. Allgemein kann angemerkt werden, dass für eine angemessene Hörsamkeit der Pegel des Nutzsignals um 10 dB höher liegen muss als das Umgebungs- bzw. Störgeräusch. Im Sinne der DIN 18041 [52] muss der Signal-Pegel, wie beispielsweise der Sprachpegel L_{SA} , mindestens 10 dB höher sein als der Gesamtstörschalldruckpegel L_{NA} .

Als Anforderung je nach Raumnutzung wird in verschiedenen Regelwerken zur Raumakustik der Wert $L_{NA,Bau}$ verwendet. Weitere Regelwerke wie die DIN 4109 [53] oder die VDI 2081 [190] führen ebenfalls Anforderungen und Empfehlungen für die Geräusche aus verschiedenen Quellen wie raumluft-technischen Anlagen, Sanitärinstallationen oder anderen haustechnischen Anlagen (Fahrstühle, Müllabwurfanlagen, Garagenanlagen etc.) an. Diese Geräusche unterliegen teils gesetzlichen Vorgaben des Baurechts [87] oder sind ordnungsrechtlich beispielsweise durch eine Hausordnung geregelt. Es ist anzumerken, dass die jeweiligen Kenngrößen auf einem Mittelungspegel oder aber auch kurzfristigen Geräuschspitzen beruhen. Eine Diskussion der Details dieser im weitesten Sinne bauakustischen Kenngrößen würde aber den Rahmen dieses Buchs sprengen. Es wird auf die einschlägige Literatur z. B. von Fischer/Schneider [87] oder Lips [128] verwiesen.

Schallfelder

Bei der Ausbreitung von Schall in geschlossenen Räumen kommt es zu einer Wechselwirkung zwischen den Materialien im Raum und den Schallwellen. Neben den Materialien sämtlicher Oberflächen hat die Raumgröße einen wichtigen Einfluss auf die Verteilung des Schalls im Raum. Schon der Aufbau bzw. das Einschwingen des Schallfeldes im Raum unterliegt hierbei dem Einfluss von Materialien, der Raumgeometrie und auch der Position und Anzahl der Schallquellen.

Die Schallausbreitung in Räumen kann somit zeitlich als auch räumlich sehr variieren. Als Schallfeld wird der eingeschwungene Zustand der Schallausbreitung im Raum bezeichnet. Die wissenschaftlich korrekte Beschreibung des Schallfeldes kann eine durchaus komplexe Aufgabe sein. Auf entsprechende

vertiefende Fachliteratur wie das Buch »Raumakustische Felder« [137] ist zu verweisen. In der Raumakustik wird daher häufig mit Näherungen gearbeitet. Eine in der Anwendung weit verbreitete und erprobte Näherung stellt die Idee des »diffusen« Schallfeldes dar. Streng genommen existiert keine wissenschaftlich exakte Definition für ein »diffuses« Schallfeld. Es werden häufig hinreichende Bedingungen benannt, die dann zu dem führen, was unter einem »diffusen« Schallfeld verstanden werden soll. Neben einem möglichst wenig schwankenden Schallpegel im Raum wird auch die Anzahl der Raumresonanzen oder Eigenschwingungen eines Raums innerhalb eines bestimmten Frequenzbereichs als Kriterium für das Vorhandensein eines »diffusen« Schallfeldes genannt, siehe auch Abschnitt 6.4 zu den Grenzen der Diffusfeld-Raumakustik.

Aus raumakustischer oder physikalischer Sicht ist es sinnvoll, die Beschreibung des Schallfeldes anhand des Verhältnisses der Raumgröße zur Wellenlänge des betrachteten Schalls vorzunehmen. Bei tiefen Frequenzen, d. h. in einem Bereich mit geringem Unterschied wenigstens einer Raumabmessung und der Wellenlänge des Schalls, kommt es zur Ausbildung sogenannter stehender Wellen im Raum. Stehende Wellen oder auch Raummoden bilden sich immer dann aus, wenn bei weitgehend stark reflektierenden Raumbegrenzungen die Wellenlänge des Schalls zu mindestens einer Raumabmessung passt. Weitere Details hierzu sind in Abschnitt 6.4 zu finden.

Bei hohen Frequenzen, also wenn die Schallwellenlänge deutlich kleiner ist als jede Raumabmessung, kommt es schon in relativ kleinen Räumen zu einer guten Durchmischung der reflektierten Schallanteile. Die Schallausbreitung bei hohen Frequenzen kann näherungsweise mit einem Lichtstrahl verglichen werden. In diesem Zusammenhang wird von Schallstrahlen, geometrischer Raumakustik oder auch statistischer Raumakustik gesprochen. Die Idee des Schallstrahls führt zu einer Modellbildung oder Vorstellung, wie sich der Schall im Raum ausbreitet. Diese Art der Schallausbreitung unterscheidet zwischen Direktschall und reflektierten Schallanteilen. Dies ist exemplarisch in Abbildung 3.2 skizziert. Der Gegensatz hierzu ist die zuvor erwähnte wellentheoretische Raumakustik, die immer dann greift, wenn Raumabmessungen und Wellenlängen in derselben Größenordnung liegen.

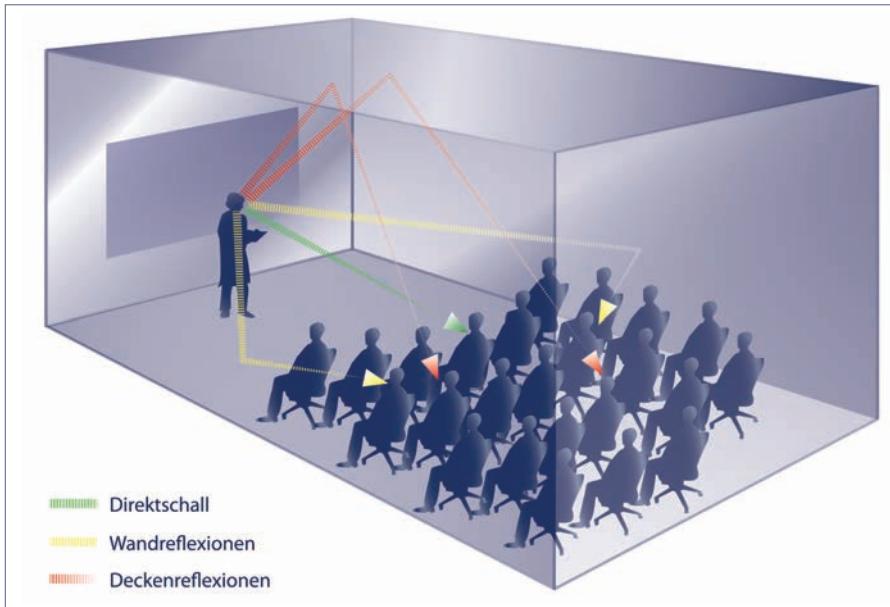


Abbildung 3.2 Prinzipielle Ausbreitung von Schall als Strahlen im Raum

Die beschriebene und eher physikalisch motivierte Abgrenzung zwischen den beiden raumakustischen Beschreibungsweisen kann mathematisch abgeleitet werden und führt zum Begriff der Grenzfrequenz, die unter Abschnitt 6.4 eingeführt und beschrieben wird.

Bei Alltagsräumen mit nicht zu kleinen Raumvolumina genügt in der Regel die geometrische oder statistische Betrachtung, die auch als Diffusfeld-Näherung bezeichnet wird. Bei Räumen mit sehr kleinen Raumvolumina, ungünstigen Abmessungen und tiefen Frequenzen kann es zu Effekten kommen, die eine weitergehende Betrachtung auf Grundlage der wellentheoretischen Raumakustik notwendig machen.

Neben dieser akustisch motivierten Unterscheidung der Raumgrößen anhand des Verhältnisses von Raumabmessung und Wellenlänge wird häufig auch eine geometrische Betrachtung verschiedener Raumformen angeführt. Hierbei wird zwischen kubischen, flachen und langen Räumen unterschieden.

Für näherungsweise kubische Räume kann in der Regel ein diffuses Schallfeld angenommen werden [85], wenn die maximale Länge und Breite zwischen dem 0,3-Fachen und dem 3-Fachen der Raumhöhe liegen und die Breite höchstens das 2-Fache der Länge beträgt. Zu beachten ist, dass auch in diesen Räumen raumakustische Defizite, wie deutlich hörbare Reflexionen oder auch Echos, auftreten können, wenn die Verteilung der Absorption nicht gewissen Regeln folgt oder aber akustisch ungünstige Raumformen vorliegen.

Von Flachräumen wird gesprochen [85], wenn die Länge mehr als das 5-Fache der Höhe und die Breite mehr als das 3-Fache der Höhe beträgt. Beispiele für Alltagsräume, die aus akustischer Sicht häufig als Flachräume angesehen werden können, sind Großraumbüros, Restaurants oder auch Tiefgaragen. Langräume können entsprechend als Räume so definiert werden, dass die Länge mehr als das 5-Fache der Höhe beträgt und zugleich die Breite zwischen dem 0,3- bis 3-Fachen der Höhe liegt. Flure, Tunnel und U-Bahn-Stationen sind typische Beispiele für Langräume.

In Flach- und Langräumen kann es je nach Form und Ausstattung mit schallabsorbierenden Materialien zur Ausbildung von nicht-diffusen Schallfeldern kommen. Neben der generellen Raumform ist aber auch die akustische Gestaltung einzelner Raumbegrenzungsflächen von Bedeutung für das Schallfeld im Raum. Zur Identifizierung von akustisch ungünstigen Formen hilft wiederum die Vorstellung von Schallstrahlen als Modell für die Schallausbreitung.

In jedem Raum sind neben der Raumform somit auch die angemessene Gestaltung der Raumbegrenzungsflächen und der Möblierung als Grundvoraussetzungen für eine gute Akustik zu berücksichtigen. Was als gute Akustik in einem Raum angesehen wird, hängt ferner von der Nutzung des Raums ab. In den folgenden Abschnitten werden allgemein die prinzipiellen Mechanismen bei der Wechselwirkung zwischen Schall und einem Material skizziert.

3.3 Schall und Materialien – Absorption, Reflexion, Diffusion

Trifft eine (Luft-)Schallwelle auf einen Körper auf, kommt es je nach dessen Material- und Oberflächenbeschaffenheit zu einer Wechselwirkung zwischen dem Schall und dem Material. Aufgrund der stark unterschiedlichen Wellenlängen bzw. Frequenzen ist diese Wechselwirkung stets frequenzabhängig.

Im Rahmen der Bauakustik liegt das Augenmerk auf dem Schalldurchgang oder auch der Transmission durch ein Bauteil, also z. B. eine Wand, eine Decke, eine Tür, ein Fenster etc. (vgl. Abbildung 3.1). Der Schalldurchgang wird durch die frequenzabhängige Schalldämmung des Bauteils beschrieben. Die Schalldämmung bestimmt den Schallschutz eines Gebäudes und ist nicht Thema dieses Buches.

In der Raumakustik wird die Beeinflussung und Veränderung des Schalls durch die Oberflächen im Raum betrachtet. Neben den Raumbegrenzungsflächen haben auch die weiteren Flächen im Raum, wie Möbeloberflächen und andere Ausstattungen bis hin zu den Menschen im Raum, eine Bedeutung für die Akustik des Raums. Auch diese Wechselwirkung der Flächen im Raum bei der Ausbreitung des Schalls ist frequenzabhängig.

Es ist regelmäßig zu beobachten, dass beispielsweise die Orgel einer Kirche bei voller Besetzung ganz anders klingt als im unbesetzten Zustand.

Die akustische Wechselwirkung eines Materials oder besser einer Fläche im Raum hängt zum einen von der Materialbeschaffenheit und zum anderen von der Flächengröße, -form und -position im Raum ab. Zur akustischen Wirkung von Materialien werden im Folgenden die grundlegenden Mechanismen sowie ganz allgemein Schallabsorber vorgestellt. Der Schallanteil, der nicht vom Material absorbiert wird, verbleibt als Reflexion im Raum. Die Reflexion erfolgt auf unterschiedliche Art und Weise, was wiederum von der Oberflächenform abhängt. Die Ursache hierfür ist in dem Verhältnis zwischen der Wellenlänge des Schalls und der Größe der Oberflächenstrukturen zu sehen.

Allgemein ist bei der Reflexion von Schallwellen zwischen drei Möglichkeiten zu unterscheiden, die in Abbildung 3.3 skizziert sind.

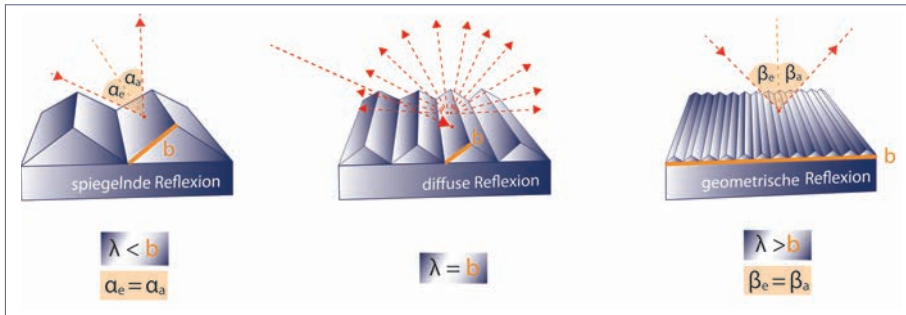


Abbildung 3.3 Verschiedene Arten der Reflexion in Abhängigkeit von der Strukturgröße b der Oberfläche bezogen auf die Wellenlänge λ

Wellenlänge kleiner als Strukturgröße

In diesem Fall kann der einfallende Schall näherungsweise als Schallstrahl ähnlich einem Lichtstrahl aufgefasst werden. Es kommt zur geometrischen Reflexion des Schalls, die dem in der Optik bekannten Gesetz folgt, d. h. der Einfallswinkel ist gleich dem Ausfallwinkel. Die beiden Schallstrahlen liegen zudem in einer Ebene. Diese geometrische Reflexion wird auch als spiegelnde Reflexion bezeichnet.

Wellenlänge und Strukturgröße ungefähr gleich

Für diesen Fall kommt es nicht mehr zur gerichteten oder auch geometrischen Reflexion. Ungerichtete, gestreute oder auch diffuse Reflexionen treten auf. Der Anteil des reflektierten Schalls in Richtung des geometrischen Ausfallwinkels verringert sich bzw. es gibt keinen eindeutigen Ausfallwinkel mehr. Je nach Struktur wird der Schall auch aus der Schnittebene heraus reflektiert.

Wellenlänge größer als Strukturgröße

Die der Grundstruktur aufgeprägte Feinstruktur kann in diesem Fall vernachlässigt werden. Es kommt zur geometrischen Reflexion an der Grundstruktur der Fläche.

Die Reflexion an einer strukturierten Fläche kann somit gerade bei verschiedenen Strukturgrößen zu sehr unterschiedlichen Effekten je nach Frequenz führen.

Gezielte geometrische Reflexionen an idealerweise wenig absorbierenden Flächen werden in Räumen zur Schalllenkung eingesetzt. Die diffuse Reflexion oder auch Streuung bzw. Diffusion von Schall an den Oberflächen im Raum führt zu einer guten Durchmischung der reflektierten Schallanteile. Gerade in Räumen für Musik ist dies gewünscht. Zu starke geometrische Reflexionen von einzelnen Wandflächen können jedoch wahrnehmbar sein und mitunter störend wirken. Dies gilt auch für Räume mit sprachlichen und kommunikativen Nutzungen. Der Aspekt der diffusen Schallreflexion ist in allen Räumen im Rahmen der raumakustischen Planung, wenngleich mit unterschiedlichem Gewicht, zu beachten.

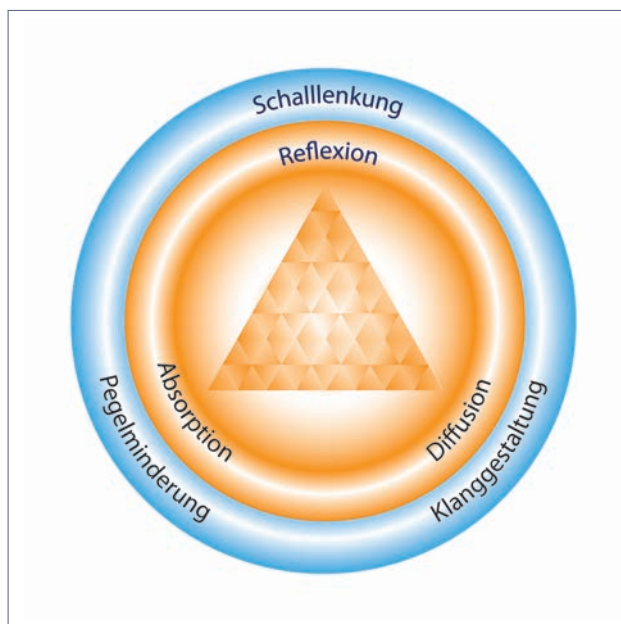


Abbildung 3.4 Schema zur Beschreibung der notwendigen Absorption, Reflexion und Diffusion der Oberflächen in einem Raum nach [27]

Der nicht von einer Fläche reflektierte Anteil der Schallenergie wird als Schallabsorption bezeichnet. Bei dem Auftreffen einer Schallwelle auf eine Fläche spaltet sich die Energie in die Anteile der Transmission, der Reflexion und der Absorption der Fläche. Die Summe dieser drei Anteile entspricht der auftreffenden Energie. In der Regel kann in der Raumakustik davon ausgegangen werden, dass die Transmissionsanteile um einige Größenordnungen geringer als die Reflexion oder auch die Absorption sind. Somit werden in der

Raumakustik klassischerweise Materialien durch ihre Absorption charakterisiert. Die entsprechenden physikalischen Kenngrößen werden im Abschnitt 3.4 im Detail vorgestellt.

Als Zusammenfassung der akustischen Wirkung von Flächen in einem Raum wird die Darstellung in Abbildung 3.4 in Anlehnung an den Vorschlag von Cox/D’Antonio [27] aufgegriffen. Je nach Nutzung ist der Schwerpunkt der akustischen Wirkung der Oberflächen in einem Raum im Bereich der Absorption, der Reflexion oder der Diffusion anzusetzen. Die Absorption dient hierbei in der Regel der Pegelminderung, die Reflexion der Schalllenkung und die Diffusion der Klanggestaltung im Raum. Die in Abbildung außen im blauen Ring skizzierten Funktionen einer Fläche im Raum korrespondieren mit den im inneren gelben Ring angeführten Materialeigenschaften. Jeder Raum oder besser Raumtyp, wie beispielsweise ein Klassenraum, ein Besprechungsraum, ein Büroraum, ein Mehrzweckraum oder auch ein Konzertsaal, ist hier individuell auf die Bedürfnisse der Nutzer anzupassen. Die Gesamtheit der Flächen mit ihren akustischen Eigenschaften führt dann zu den notwendigen und gewünschten raumakustischen Bedingungen im Raum.

Ein Raum wie die Produktionshalle einer Werft benötigt aus Gründen der Lärmminde- rung große Oberflächen zur Absorption und damit Pegelminderung. In einem Klassen- raum sind neben absorbierenden Flächen auch Flächen notwendig, die den Schall diffus streuen und je nach Raumgröße auch reflektierende Anteile in den Oberflächen, um den Schall in bestimmte Raumbereiche zu lenken. In größeren Auditorien werden wieder- um die Aspekte der Reflexion/Schalllenkung wichtiger und der Aspekt der Absorption nimmt ab. Aufnahmestudios schließlich verfügen in der Regel über sehr viel Absorption bei gleichzeitig starker Diffusion der Oberflächen im Raum.

3.4 Schallabsorber – Absorptionsgrade

Schallabsorber, also schallabsorbierende Aufbauten oder Elemente, werden in Räumen genutzt, um die Schallenergie im Raum in eine andere Energieform umzuwandeln und damit dem Raum zu entziehen. Hierdurch wird es zum einen im Raum leiser und zudem wird die Schallausbreitung im Raum durch eine Änderung der Reflexionen verändert. Eine schallabsorbierende Fläche in der Nähe einer Schallquelle führt dazu, dass der Schall sich mit geringerer Stärke im Raum ausbreiten kann.

Die Betrachtung der Schallreflexion an einer Fläche führt zum Begriff des Absorptionsgrades. Unter Schallabsorption wird physikalisch die Umwandlung von Schall- in Wärmeenergie verstanden. Das Absorptionsvermögen eines Materials wird mit Hilfe des Schallabsorptionsgrades (früher als »Schluckgrad« bezeichnet oder kurz Absorptionsgrad) beschrieben. Der physikalische Absorptionsgrad α gibt den an der Fläche absorbierten Anteil der auftreffenden Schallenergie an:

$$\alpha = \frac{\text{absorbierte Energie}}{\text{auftreffende Energie}} \quad 3.1$$

Trifft eine Schallwelle senkrecht auf den Schallabsorber, so wird der zugehörige Absorptionsgrad mit α_0 bezeichnet. Bei nicht senkrechtem Schalleinfall, also unter einem Winkel θ zur Fläche, kann entsprechend ein Absorptionsgrad α_θ für schrägen Schalleinfall definiert werden. Für gleichmäßig aus allen Richtungen auf den Absorber auftreffenden Schall kann der Absorptionsgrad α_{st} für statistischen oder auch diffusen Schalleinfall bestimmt werden. Eine Berechnung von α_{st} ist theoretisch durch die Bildung eines Mittelwerts über alle Einfallswinkel möglich.

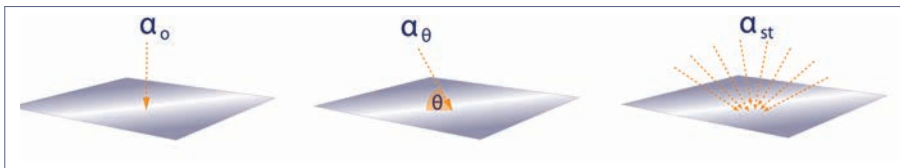


Abbildung 3.5 Darstellung der verschiedenen Absorptionsgrade; Absorptionsgrad α_0 für senkrechten Schalleinfall, α_θ für Schalleinfall unter einem bestimmten Winkel und α_{st} für statistischen Schalleinfall

Im Bereich der Raumakustik wird in der Regel der sogenannte Sabinesche Absorptionsgrad α_s verwendet. Er basiert auf mehreren Annahmen bezüglich des im Raum vorhandenen Schallfeldes und auf der Sabineschen Nachhallformel, siehe Abschnitt 6.2. Der Sabinesche Absorptionsgrad gibt den Mittelwert des Absorptionsgrades einer bestimmten Raumbegrenzungsfläche an, wenn der Raum nicht zu klein, die Bedämpfung des Raums nicht zu groß ist und einige weitere Voraussetzungen erfüllt werden [33]. Eine exakte Vorausberechnung von α_s ist praktisch nicht möglich, sondern erfordert immer eine Annahme zu dem Schallfeld im Raum. Ein unmittelbarer Vergleich mit dem

Absorptionsgrad für statistischen Schalleinfall α_{st} ist daher nicht sinnvoll, sondern kann lediglich als Anhaltspunkt beim Vergleich verschiedener Messverfahren dienen.

Neben den genannten Definitionen für Absorptionsgrade existiert eine Reihe weiterer Definitionsvorschläge für den Schallabsorptionsgrad [81, 145, 150], die sich in der Praxis nicht durchgesetzt haben. Allein von Morse [150] werden bereits 1940 vier verschiedene Absorptionsgrade definiert, beispielsweise ein Absorptionsgrad für eine streifend auf eine Wand treffende Raummode. Von dem bekannten Akustiker Hunt [105] wurde in diesem Zusammenhang schon im Jahr 1939 von einem »Absorptionsgrad-Problem« gesprochen. Auch in der aktuellen Literatur wie von Mechel [134] wird noch mehr als fünfzig Jahre später die zu große Anzahl verschiedener Absorptionsgrade beklagt. Der Hinweis auf die Vielzahl von Absorptionsgraden soll nicht verwirren, aber darauf hinweisen, dass durchaus Verwechslungsgefahr bei der Angabe eines Absorptionsgrads besteht.

Die Bestimmung des Sabineschen Absorptionsgrads α_s ist durch die weltweit eingeführte DIN EN ISO 354 [72] eindeutig beschrieben. Details hierzu sind im folgenden Abschnitt 3.5 dargestellt.

Prinzipiell kann die Umwandlung von Schallenergie in andere Energieformen auf verschiedene Art und Weise erfolgen. Aus physikalischer Sicht werden zwei Mechanismen unterschieden, entsprechend wird einerseits von porösen Schallabsorbern und andererseits von Resonanzabsorbern gesprochen.

Diese beiden Absorberarten führen in der Regel zu prinzipiell verschiedenen Frequenzcharakteristiken des Absorptionsgrads. Dies resultiert aus den beiden zugrunde liegenden physikalischen Mechanismen. Poröse Schallabsorber zeigen meist einen Anstieg des Schallabsorptionsgrads von tiefen zu hohen Frequenzen. Bei Resonanzabsorbern tritt dagegen ein mehr oder weniger stark ausgeprägtes (lokales) Maximum der Absorption auf, d. h. der Absorptionsgrad steigt von tiefen Frequenzen aus bis zu einem Maximum an und sinkt zu höheren Frequenzen hin wieder ab. Viele der in der Praxis verwendeten Schallabsorber nutzen eine Kombination von beiden Mechanismen zur Schallabsorption. Der prinzipielle Verlauf des frequenzabhängigen Absorptionsgrads ist für die verschiedenen Absorberarten in Abbildung 3.6 skizziert.

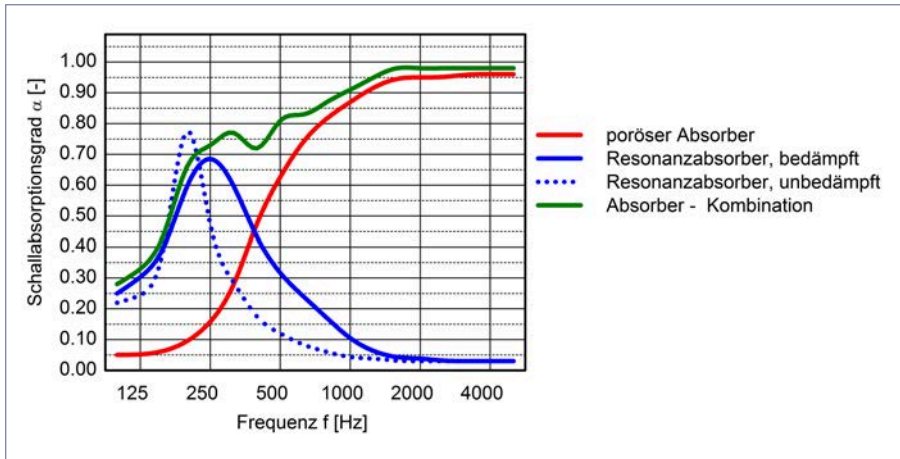


Abbildung 3.6 Skizze zum prinzipiellen Verlauf des frequenzabhängigen Absorptionsgrads von porösen Schallabsorbern, bedämpften und unbedämpften Resonanzabsorbern sowie möglichen Kombinationen daraus

Im Folgenden werden die beiden Absorberarten kurz erläutert. Die mathematische Modellierung sowie Interpretation der Wirkungsweise von Schallabsorbern kann als eigenes Teilgebiet der physikalischen Akustik angesehen werden, hierzu siehe die Bücher von Mechel [134, 135, 136] und das Werk von Cox/D'Antonio [27]. Eine Anwendung dieses Teilgebiets mit Bezug zur Raumakustik besteht im Entwurf und in der Entwicklung von schallabsorbierenden Aufbauten und Elementen.

3.4.1 Poröse Absorber

Bei porösen Absorbern erfolgt die Umwandlung der Schallenergie in Wärmeenergie direkt durch Reibung an einer porösen Struktur. Aufgrund der sehr geringen Energie in einer Schallwelle, selbst bei hohen Schallpegeln, tritt keine mess- oder etwa fühlbare Erwärmung des jeweiligen Materials auf, was gelegentlich vermutet wird.

Poröse Absorber sind häufig offenporige oder auch faserige Materialien wie Schäume oder Wollen. Durch die Porigkeit oder auch Porosität des Materials tritt eine deutliche Vergrößerung der Oberfläche auf. Die Porosität wird in der

Akustik als der Volumen-Anteil der Luft in einem Material definiert. Hierbei wird davon ausgegangen, dass sämtliche Hohlräume oder auch Poren nicht abgeschlossen und vom Äußeren des Materials zugänglich sind [140]. Innerhalb des Materials abgeschlossene Luftvolumina sind akustisch nicht wirksam.



Abbildung 3.7 Großaufnahme von Holzwolle als Beispiel eines porösen Absorbers

Eine Auflage bzw. ein Verschließen der Porigkeit an der Oberfläche eines porösen Absorbers kann dazu führen, dass die Schallwelle nicht mehr in den Absorber eindringen kann. Gerade für hohe Frequenzen kann durch einen Verschluss der Poren die Schallabsorption deutlich verringert werden.

Verhautete Schaumstoffe sind prinzipiell weniger schallabsorbierend als unverhautete Schaumstoffe. Durch das Streichen einer offenporigen Akustikdecke mit einer geschlossenen Farbschicht kann die absorbierende Wirkung deutlich herabgesetzt werden.

Neben der Porosität ist der Strömungswiderstand eine nicht-akustische Materialkenngröße zur akustischen Beschreibung eines porösen Schallabsorbers. Der Strömungswiderstand gibt an, welchen (Luft-)Widerstand das Material bei einer Durchströmung zeigt.

Der Strömungswiderstand variiert je nach Materialstärke und wird daher auf die Materialstärke bezogen und dann als längenspezifischer Strömungswiderstand, im Folgenden mit Ξ (altgr. χ) abgekürzt, bezeichnet. Die physikalische Einheit des Strömungswiderstandes Ξ ist Pa s/m^2 . Die Messung des längenspezifischen Strömungswiderstands erfolgt nach einem normierten Verfahren.

Viele Hersteller von Mineralwolle, Schaumstoffen und anderen porösen Materialien geben für akustisch wirksame Produkte den längenspezifischen Strömungswiderstand als Materialkenngröße an.

Prinzipiell gibt es keine idealen Werte für die Porosität und den längenspezifischen Strömungswiderstand eines Materials, da letztlich immer die Kombination beider Kenngrößen wie auch die Materialstärke die Schallabsorption eines porösen Schallabsorbers definieren. So kann bei gleicher Porosität eine große Materialstärke mit geringem Strömungswiderstand zu gleichen Absorptionswerten wie eine geringe Materialstärke mit hohem Strömungswiderstand führen.

Es existiert eine Vielzahl von mathematischen Rechenmodellen zur Vorhersage der Schallabsorption und anderer akustischer Materialkennwerte aus den nicht-akustischen Kenngrößen Porosität, Strömungswiderstand und weiteren Größen. Hier wird auf die entsprechende Fachliteratur wie [12, 13, 27, 84] verwiesen.

Bei üblichen Aufbauhöhen von einigen Zentimetern wirken poröse Absorber im mittleren und hohen Frequenzbereich. Sehr dicke Aufbauten können auch für die Absorption tiefer Frequenzen verwendet werden, was allerdings in der Raumakustik häufig aus Platzmangel nicht praktikabel ist.

3.4.2 Resonanzabsorber

Resonanzabsorber zeichnen sich dadurch aus, dass die Schallenergie nicht direkt in Wärmeenergie umgewandelt, sondern zunächst in eine andere Energieform übertragen wird. Eine häufige Form von Resonanzabsorbern sind dünne, schwingfähige Platten vor einem abgeschlossenen Luftvolumen. Der auftreffende Schall regt die Platte zur Schwingung an; die Plattenschwingung wird anschließend durch die Wechselwirkung mit dem Luftvolumen bedämpft. Durch diese zweistufige Wandlung wird der Schallwelle ebenfalls Schallenergie entzogen bzw. der auftreffende Schall absorbiert.

Charakteristisch für einen Resonanzabsorber ist eine mehr oder weniger stark ausgeprägte maximale Schallabsorption in einem eher kleinen Frequenzbereich. Dieses Maximum tritt bei einem Plattenresonator bei der Frequenz auf,

bei der die Platte besonders gut »mitschwingen« kann. In der Regel werden Resonanzabsorber so ausgelegt, dass das Maximum der Schallabsorption bei tiefen Frequenzen liegt.

Typische Beispiele für Resonanzabsorber sind dünne Sperrholzplatten, Spanplatten, Metallplatten, Gipskartonplatten, aber auch Glasscheiben oder biege-steife Membranen oder Folien. Wichtig ist, dass es sich um ein biegesteifes Material handelt, sodass sich eine Plattenschwingung ausbilden kann. Auch Einrichtungsgegenstände mit eingeschlossenen, nicht zugänglichen Luftvolumina, beispielsweise Schränke, wirken als Resonatoren.

Viele klassische Räume für Musikdarbietungen sind mit Holzverkleidungen ausgestattet, die als tieffrequent wirksame Plattenresonatoren wirken.

Die akustische Wirkung solcher auch als Plattenschwinger bezeichneter Resonanzabsorber wird sowohl durch die Biegesteifigkeit des Materials, die Größe der Platten und deren Befestigung als auch durch das eingeschlossene Luftvolumen bestimmt. Als Analogie zur Berechnung entsprechender Aufbauten wird häufig das Modell eines Masse-Feder-Systems verwendet. Hierbei übernimmt die Platte die Funktion der Masse und das eingeschlossene Luftvolumen bildet die akustische Feder.

Durch das Einbringen eines porösen Materials in das Luftvolumen wird die Resonanz des Systems verändert. In der Regel wird der Absorber hierdurch breitbandiger und die Schallabsorption nimmt im Maximum etwas ab, siehe Abbildung 3.6. Weiterhin kann die geschlossene Platte vor dem Luftvolumen perforiert werden. In diesem Fall wird von Lochplattenschwingern gesprochen. Auch für Lochplattenschwinger gelten die Hinweise zu einem porösen Material im Luftvolumen.

Perforierte Holzpaneele, gelochte Gipskartonplatten, Schlitzplatten aus Metall, Holz oder anderen Materialien oder perforierte Membranen und Folien sind typische Beispiele für Lochplattenschwinger. Neben den genannten Faktoren Biegesteifigkeit sowie Art und Weise der Befestigung der Platte treten nun der Perforationsgrad der Platte und in geringem Maße auch die Ausprägung der Perforation (Lochbild) als Parameter zur Bestimmung der Absorption hinzu. Eine mathematische Berechnung kann mitunter recht komplex werden, sodass

für praktische Anwendungen nach Möglichkeit auf Messwerte zur Schallabsorption zurückgegriffen werden sollte.

Andere Formen von Resonanzabsorbern sind sogenannte Helmholtzresonatoren, bei denen ein Luftvolumen ähnlich wie bei Musikinstrumenten in Schwingung versetzt und anschließend diese Schwingung bedämpft wird. Helmholtzresonatoren lassen sich mit Hohlräumen realisieren, die durch eine kleine Öffnung an den Raum angeschlossen werden. Für die Dimensionierung existieren auch hier mathematische Modelle und Berechnungsmethoden, die im Rahmen dieses Buchs nicht vertieft werden.

3.5 Messung akustischer Materialkennwerte

Die Messung akustischer Materialkennwerte wie der Absorption, der Reflexion oder auch der Streuung ist keinesfalls als triviale Aufgabe der akustischen Messtechnik zu verstehen. Zur Bestimmung der Schallabsorption existieren erprobte und international genormte Verfahren. Entsprechende Methoden zur Ermittlung der schallstreuenden Eigenschaften von Materialien sind als aktuelle Forschungsthemen einzustufen; erste Normungen sind vorhanden, aber noch in der Erprobungsphase. Im Folgenden werden die beiden international normativ festgelegten Methoden zur Ermittlung der Schallabsorption, Kundtsches Rohr und Hallraum, vorgestellt und anschließend weitere Ansätze zur Messung der Absorption wie auch des Streugrades kurz diskutiert.

3.5.1 Kundtsches Rohr

Die traditionelle Messanordnung zur Bestimmung des Absorptionsgrades α_0 eines Materials für senkrecht auftreffenden Schall ist das Kundtsche Rohr. Hierbei wird in einem Rohr mit möglichst gut reflektierenden, also schallharten Wänden das Schallfeld vermessen. Während sich an dem einen Ende des Rohrs ein Lautsprecher befindet, um das Schallfeld anzuregen, ist am anderen Ende die zu untersuchende Materialprobe angebracht. Je nach Materialbeschaffenheit bildet sich das Schallfeld im Rohr aus, das dann analysiert wird, um auf den Absorptionsgrad des eingebrachten Materials zu schließen.

Klassischerweise wird im Kundtschen Rohr bei Anregungen durch reine Sinustöne das Schallfeld mit einem Mikrofon abgetastet. Aus der Position von

Minima und Maxima des Schalldrucks kann der Absorptionsgrad α_0 für senkrechten Schalleinfall bestimmt werden. Die Prozedur ist dann für jede zu untersuchende Frequenz zu wiederholen. Details zu diesem klassischen Verfahren sind in DIN EN ISO 10543-1 [64] beschrieben.

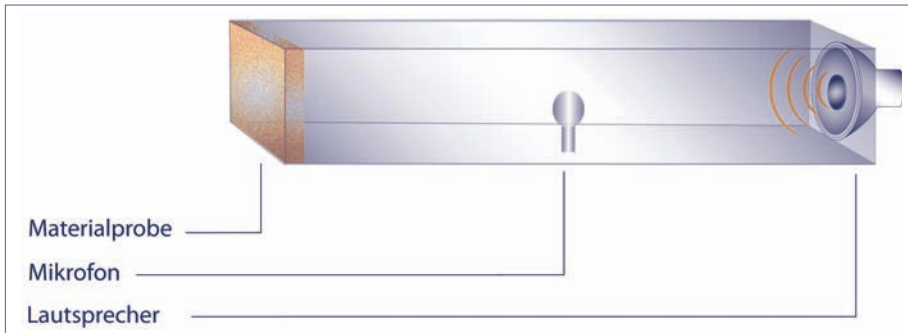


Abbildung 3.8 Prinzipskizze zum Aufbau und zur Messung im Kundtschen Rohr

Mit der DIN EN ISO 10534-2 [65] liegt eine in der Praxis schon seit Längerem angewandte Messmethode mit breitbandiger Anregung des Schallfeldes im Rohr vor, Transferfunktionsmethode genannt. Hiernach wird die Übertragungsfunktion zwischen zwei Positionen im Rohr zur Bestimmung des Absorptionsgrades α_0 verwendet. Der Vorteil der breitbandigen Anregung liegt darin, dass nur noch eine Messung zur Erfassung aller Frequenzen notwendig ist. Die beiden Verfahren, klassisch mit Sinustönen und modern mit breitbandiger Anregung, sowie die Anforderungen an die Messapparatur sind in der DIN EN ISO 10534, Teil 1 und 2 [64, 65] genau beschrieben.

Der Frequenzbereich für derartige Absorptionsgradmessungen ergibt sich im Wesentlichen aus den geometrischen Rohrabmessungen. Gebräuchlich sind sowohl runde Rohre als auch Rohre mit quadratischem oder rechteckigem Querschnitt. Bei der Transferfunktionsmethode ist die tiefste Messfrequenz durch die Auflösung der verwendeten Signalverarbeitung eingeschränkt. Der Rohrdurchmesser bzw. die Querabmessung bestimmt die höchste Messfrequenz. Typischerweise können im Kundtschen Rohr Proben mit Abmessungen zwischen 3 und 40 cm Kantenlänge bzw. Durchmesser vermessen werden. Der Frequenzbereich reicht meist von ca. 50 Hz bis 2000 oder 3000 Hz. Wenn auch höhere Frequenzen von Interesse sind, ist es notwendig, in einem kleine-

ren Rohr mit einer weiteren Probe die Messungen zu wiederholen. Durch eine weitgehende Automatisierung des Messablaufs können die Messungen schnell und zuverlässig durchgeführt werden. Es sind jeweils mehrere Proben des Materials zu untersuchen. Aus den Ergebnissen ist der Mittelwert zu bilden.

Messungen im Kundtschen Rohr sind hilfreich, um verschiedene Materialien schnell miteinander zu vergleichen. Im Rahmen von Produktentwicklungen oder -optimierungen können effektiv verschiedene Aufbauten untersucht werden. Es werden dazu lediglich kleine Probenflächen benötigt. Großflächige Resonanzabsorber erfordern große Rohrabmessungen, die in der Regel nicht vorhanden sind. Insofern können großformatige Resonanzabsorber nicht bzw. nur bei speziell ausgestatteten Prüflabors im Kundtschen Rohr vermessen werden. Die schallharte Gestaltung der Rohrwände kann allerdings bei tiefen Frequenzen problematisch sein.

Der Schallabsorptionsgrad α_0 für senkrechten Schalleinfall ist für raumakustische Anwendungen nicht geeignet.

3.5.2 Hallraum

Das Hallraumverfahren kann als die klassische Methode zur Bestimmung der Schallabsorption für raumakustische Anwendungen bezeichnet werden. Das Verfahren ist durch die DIN EN ISO 354 »Messung der Schallabsorption in Hallräumen« [72] normativ gefasst und damit international verfügbar.

Zur Bestimmung der Schallabsorption wird in einem Hallraum die Nachhallzeit des leeren Raums und des Raums mit eingebrachtem Prüfmaterial gemessen. Die Auswertung erfolgt üblicherweise in Terz-Bandbreite. Das Verfahren ist durch DIN EN ISO 354 [72] standardisiert. In der Norm werden Anforderungen an das Raumvolumen V , die »Diffusität« des Schallfeldes, das Prüfobjekt, die zu verwendenden Messgeräte und viele weitere Details gestellt. Hierdurch soll eine Vergleichbarkeit zwischen Messungen in verschiedenen Hallräumen sichergestellt werden. Die Messungen sind in den Terzbändern von 100 Hz bis 5 000 Hz durchzuführen. Für neu zu errichtende Hallräume ist ein Mindestvolumen von 200 m³ gefordert. Das Mindestvolumen des Hallraums beträgt 150 m³. Es wird darauf hingewiesen, dass bei Frequenzen unterhalb von 100 Hz das Schallfeld nicht mehr ausreichend diffus, sondern von

einer geringen Anzahl von Raummoden dominiert sein kann. Bei Hallraumvolumina von mehr als 500 m^3 wird dagegen eine genaue Messung mitunter durch die Absorption in der Luft gestört. Diese Hinweise entsprechen dem Erfahrungswissen, das schon an anderer Stelle zu finden ist, siehe [31]. Insofern entspricht die normative Festlegung des Hallraumvolumens auf 200 m^3 einem guten Kompromiss zur Abdeckung des in der raumakustischen Anwendung benötigten Frequenzbereichs. Auch zur Form des Hallraums gibt die Norm Empfehlungen, um ein möglichst homogenes Schallfeld im Raum zu gewährleisten.

Bei den Prüfobjekten wird zwischen flächenhaften Schallabsorbern und einzelnen Schallabsorbern unterschieden. Bei flächenhaften Absorbern ist eine überdeckte Fläche von 10 m^2 bis 12 m^2 erforderlich. Verschiedene Aufbauarten sind im normativen Anhang B der DIN EN ISO 354 [72] dargestellt. Die Tabelle 3.2 gibt eine Übersicht der verschiedenen angeführten Aufbauarten von flächigen Schallabsorbern. In den Abbildungen 3.9 und 3.10 sind typische Messaufbauten im Hallraum dargestellt.

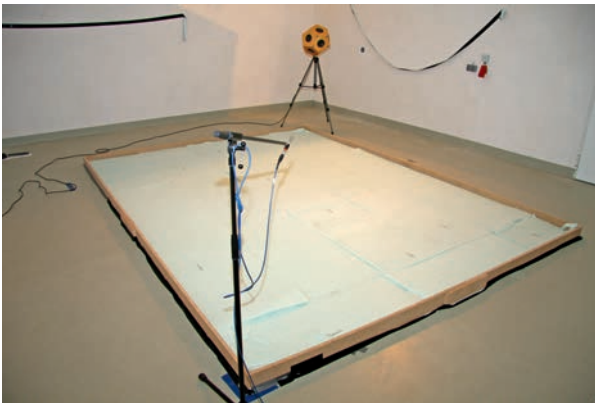


Abbildung 3.9 Messung
im Hallraum mit flächigem
Schallabsorber

Neben den flächenhaften Schallabsorbern werden einzelne Schallabsorber angeführt. Als Beispiele für einzelne Schallabsorber werden rechteckige schallabsorbierende Platten oder Baffles genannt, die nach den Vorgaben des Aufbautyps J aus dem Anhang B hinsichtlich des Schallabsorptionsgrads zu vermessen sind. Andere einzelne Schallabsorber sind Einzelobjekte wie Stühle, freistehende Stellwände oder Personen, die für die Messung möglichst wie in der Praxis üblich angeordnet werden sollen. Es wird darauf hingewiesen, dass die Prüfobjekte bei einzelnen Schallabsorbern mindestens aus drei gleichar-







Aufbau	Kurzbeschreibung und weitere Hinweise
Typ A 	direkte Montage des Prüfobjekts an einer Raumbooberfläche mit Klebemitteln oder mechanischen Befestigungen Beispiele: Teppichböden, aufgeklebte Schaumstoffe Absorptionswerte in Tabellen 8.3 im Anhang
Typ B 	Aufbau für Produkte, die direkt mit einem Kleber auf einen harten Untergrund gebracht werden Beispiele: Akustikputze auf einer Trägerplatte, poröse Materialien mit Tragstruktur Absorptionswerte in Tabelle 8.4 im Anhang
Typ E 	Befestigung des Prüfobjekts mit einem Luftspalt; Prüfobjekte können »auf dem Kopf« stehend auf den Boden des Hallraums aufgebracht werden; es sollte mit Abständen von 200 mm und 400 mm geprüft werden; andere Abstände können verwendet werden Beispiele: Rasterdecken Absorptionswerte in Tabelle 8.5 im Anhang
Typ G 	hängende Montage des Prüfobjekts; es soll mit einem Abstand der Vorderfläche des Prüfobjekts zur Wand des Hallraums von 100 mm geprüft werden; weitere Abstände als Vielfaches von 50 mm können verwendet werden Beispiele: Vorhänge, Rollos, Sonnenblenden Absorptionswerte in Tabelle 8.7 im Anhang
Typ I 	Aufbau für aufgespritzte oder mit Kelle aufgetragene Materialien Beispiele: Akustikputze Absorptionswerte in Tabelle 8.4 im Anhang
Typ J 	Aufbau für rechteckige schallabsorbierende Platten oder Baffles; Platten oder Baffles müssen in zwei oder drei Reihen angeordnet werden Beispiele: Platten, Baffles Absorptionswerte in Tabelle 8.7 im Anhang

Tabelle 3.2 Aufbautypen für Prüfobjekte und Beispiele in Anlehnung an den normativen Anhang B der DIN EN ISO 354 [72] sowie Hinweise zu entsprechenden Ergebnissen im Anhang

tigen Objekten bestehen müssen. Sofern das Prüfobjekt lediglich aus einem Objekt besteht, ist dieses an mindestens drei Standorten im Hallraum zu vermessen. Weitere Details zur Anordnung der Prüfobjekte sind der Norm [72] zu entnehmen.



Abbildung 3.10 Messung im Hallraum von schallabsorbierenden Sitzmöbeln
[Quelle: SMV Sitz- und Objektmöbel GmbH]

Um den Einfluss von Temperatur- und Feuchteschwankungen auf das Messergebnis zu minimieren, sollten die Messungen im leeren und mit dem Prüfobjekt bestückten Hallraum unter nahezu gleichen Bedingungen durchgeführt werden. Zur Messung sind eine Schallquelle wie auch Mikrofone mit einer kugelförmigen Charakteristik zu verwenden. Die Vorgaben zur Messdurchführung, insbesondere hinsichtlich der Positionierung von Prüfobjekt und Schallquelle als auch Mikrofonen im Raum, sind detailliert in der Norm [72] beschrieben.

Die Berechnung der äquivalenten Absorptionsfläche A_1 des leeren Hallraums bzw. A_2 des Hallraums mit Prüfobjekt erfolgt mit Hilfe der folgenden Formeln:

$$A_1 = 55,3 \frac{V}{c T_1} - 4 V m_1 \quad 3.2$$

$$A_2 = 55,3 \frac{V}{c T_2} - 4 V m_2 \quad 3.3$$

mit

V	Volumen des Hallraums in m^3
c	Schallgeschwindigkeit in Luft in m/s
T_1	Nachhallzeit des leeren Hallraums in s
T_2	Nachhallzeit des Hallraums mit Prüfobjekt in s
m_1, m_2	Luftabsorptionskoeffizient mit den Klimabedingungen, die bei der Messung ohne bzw. mit Prüfobjekt vorhanden waren, in $1/m$

Diese beiden Gleichungen basieren auf der Sabineschen Nachhallformel, die in Kapitel 6 vorgestellt wird. Das Konzept der äquivalenten Absorptionsfläche wird unter Ziffer 3.6.1 eingehender erläutert.

Die äquivalente Absorptionsfläche des Prüfobjekts A_T ergibt sich aus der Differenz der äquivalenten Absorptionsfläche im Hallraum mit Prüfobjekt A_2 und im leeren Hallraum A_1 :

$$A_T = A_2 - A_1 \quad 3.4$$

Für flächenhafte Schallabsorber kann anschließend mit der vom Prüfobjekt überdeckten Fläche S der Schallabsorptionsgrad α_S berechnet werden:

$$\alpha_S = \frac{A_T}{S} \quad 3.5$$

Der Index S wird verwendet, um auf das beschriebene Verfahren im Hallraum hinzuweisen. Hierdurch soll klargestellt werden, dass dieser Absorptionsgrad eine andere Grundlage hat als der aus rein physikalischer Sicht definierte Absorptionsgrad α nach Gleichung 3.1.

Bei Absorbern mit zwei beschallten Seiten, wie Stellwänden oder auch sogenannten Akustik-Segeln, -Wolken oder anderen Freiformen, enthält die Norm keine konkreten Vorgaben, wie die Bezugsfläche S zu ermitteln ist. Es gibt lediglich die Anmerkung, dass »bei beidseitig beschallten Absorbern der Schallabsorptionsgrad das Verhältnis aus äquivalenter Schallabsorptionsfläche des Prüfobjekts und der Fläche der beiden Seiten des Prüfobjekts ist« [72, Anmerkung 1 unter Ziffer 3.9].

Für einzelne Schallabsorber sollte die äquivalente Schallabsorptionsfläche je Objekt A_{obj} angegeben werden. Hierzu ist die äquivalente Absorptionsfläche A_T durch die Anzahl der Objekte n , in der Regel $n = 3$, zu teilen, entsprechend gilt:

$$A_{\text{obj}} = \frac{A_T}{n}. \quad 3.6$$

Es besteht in der aktuellen Fassung der Norm die Unklarheit, wie mit Objekten wie Stellwänden, Tischaufsätzen und anderen Möbelementen zu verfahren ist, die durchaus die Definition einer Oberfläche bzw. Bezugsfläche S zulassen. In der Praxis ist für derartige Elemente durchaus der Schallabsorptionsgrad α_S

bezogen auf eine dann angegebene Bezugsfläche zu finden. Sofern die Angabe der Bezugsfläche fehlt, sind die Absorptionswerte nicht nutzbar.

In der DIN EN ISO 354 [72] wird weiterhin darauf hingewiesen, dass nach DIN EN ISO 11654 [66] (siehe Abschnitt 3.6) ein Einzahlwert bestimmt werden kann. Ebenfalls nach DIN EN ISO 11654 können aus den in Terzbandbreite gemessenen Absorptionswerten durch arithmetische Mittelwertbildung aus je drei Terzwerten die Oktavwerte des Absorptionsgrads bestimmt werden.

Bei dem Hallraumverfahren handelt es sich um ein indirektes Messverfahren zur Ermittlung der Schallabsorption, das auf idealisierten Annahmen zum Schallfeld wie auch auf der Näherung der Sabineschen Nachhallformel (siehe Abschnitt 6.1) beruht. Eigentliche Messgrößen sind die beiden Nachhallzeiten im leeren und im mit der Probe bestückten Raum. Hieraus, und da weitere idealisierende Voraussetzungen nicht erfüllt sind, können physikalisch unplausible Messergebnisse mit $\alpha_s > 1$ resultieren. Eine Ursache dafür ist der sogenannte »Kanteneffekt«. Hierunter wird zusammengefasst, dass es bei jedem Materialwechsel in einer Oberfläche zu einer Streuung des Schalls kommt. Diese Streuung trägt zusätzlich zur Absorption im Hallraum bei der Messung mit dem Prüfobjekt bei. Ferner wird streng genommen durch das Einbringen des Prüfobjekts in nur einer Raumrichtung die »Diffusität« des Schallfeldes verändert oder gestört. Auch diese Änderung des Schallfeldes gegenüber der idealisierenden Annahme des ortsunabhängigen und homogenen Schallfeldes im gesamten (Hall-)Raum führt zu einer scheinbar zusätzlichen Absorption, die in der Summe zu Werten von $\alpha_s \geq 1$ führen kann.

Die Ergebnisse aus Hallräumen verschiedener Labors zeigen speziell bei tiefen Frequenzen für das gleiche Material recht hohe Abweichungen untereinander. Zahlreiche Ringversuche zwischen verschiedenen Hallräumen zeigen Abweichungen von bis zu 0,1 für α_s [27, 111, 115]. Auch in der DIN EN ISO 354 [72] werden Aussagen zur Präzision des Verfahrens getroffen. Diese systematischen Abweichungen sind ebenfalls Gegenstand theoretischer Untersuchungen; ein recht umfassender Überblick wird von Kuttruff [120] gegeben. Die Genauigkeit der Messungen kann für praktische Zwecke überschlägig mit $\pm 0,05$ in den einzelnen Terzbändern abgeschätzt werden. Hierzu ist eine normative Angabe in Kürze zu erwarten, da das Thema Messunsicherheiten auch bei der Angabe der Schallabsorption zunehmend an Bedeutung gewinnt.

Schallabsorptionsgrad nach DIN EN ISO 354, DIN EN ISO 11654, ASTM C 423

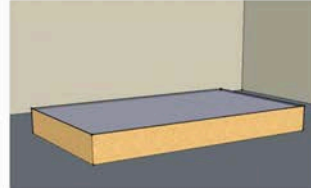
Auftraggeber: Beispielfirma

Objekt:

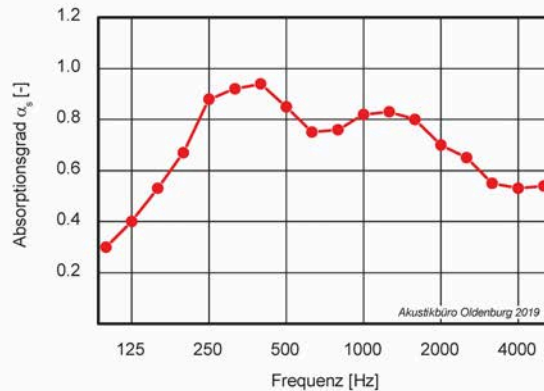
Beschreibung des Objekts

Aufbau (skizzenhaft):

- Gipskartonplatte, gelochter Gipskarton 10/23 Rundlochung, 12,5 mm Plattendicke
- 400 mm Luftraum mit umlaufendem Rahmen
- 20 mm Mineralwollauflage direkt hinter der Platte
- Betonboden

Foto des Messaufbaus:**Schallabsorptionsgrad α_s nach DIN EN ISO 354**

Frequenz [Hz]	α_s [-]
100	0,30
125	0,40
160	0,53
200	0,67
250	0,88
315	0,92
400	0,94
500	0,85
630	0,75
800	0,76
1000	0,82
1250	0,83
1600	0,80
2000	0,70
2500	0,65
3150	0,55
4000	0,53
5000	0,54

**Einzahlwerte:****NRC = 0,75****SAA = 0,76** **$\alpha_w = 0,70$ (L)⁽¹⁾****Schallabsorberklasse C****Hallraum:** ITAP GmbH⁽²⁾**Prüfdatum:** 01.03.2019**Volumen:** 200 m³**Prüffläche:** 12,0 m²**Temperatur:** 20°C / 19°C⁽³⁾**Luftfeuchtigkeit:** 93 % / 80 %⁽³⁾**Praktischer Schallabsorptionsgrad nach EN ISO 11654**

Frequenz [Hz]	α_p [-]
125	0,70
250	0,90
500	0,80
1000	0,80
2000	0,60
4000	0,65

¹ Es wird eindringlich empfohlen, diese Einzahlbewertung in Verbindung mit der vollständigen Kurve des Schallabsorptionsgrades zu verwenden² Angaben zum Hallraum können bei den Autoren dieses Berichts bzw. der ITAP GmbH in Oldenburg angefordert werden³ Leermessung / Messung mit Prüfling**Akustikbüro Oldenburg**

Dr. Christian Nocke

Bericht Nr. 2019/0007_0815

Oldenburg, 01. März 2019

Unterschrift:

Timo Meyer

Abbildung 3.11 Prüfzeugnis zu einer Hallraummessung einer akustisch wirksamen Decke mit Angabe der Absorptionswerte sowie der Einzahlangaben der Schallabsorption

Prüfzeugnisse Absorption

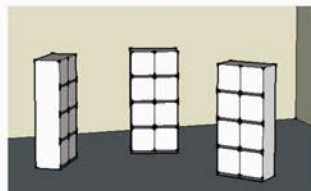
In diesem abschließenden Abschnitt werden beispielhaft Prüfzeugnisse mit Angaben zur Schallabsorption dargestellt. DIN EN ISO 354 [72] enthält keine Vorgabe für Formblätter oder konkrete Hinweise zur Gestaltung entsprechender Dokumente. Die in den Abbildungen 3.11 und 3.12 dargestellten Prüfzeugnisse zeigen neben den Messergebnissen eine Reihe von weiteren Angaben zur Messung. Neben dem Datum, dem Ort sowie dem Verantwortlichen sollten auch möglichst detaillierte Angaben zum verwendeten Aufbau des Messobjekts zu finden sein. Aus Sicht des Autors hat es sich bewährt, neben textlichen Beschreibungen auch eine Skizze oder eine Abbildung einzufügen.

Die klaren Vorgaben der Messvorschrift DIN EN ISO 354 [72] werden von einigen Herstellern von vermeintlich schallabsorbierenden Produkten nicht beachtet. Es werden Messungen in zu kleinen und damit ungeeigneten Räumen, mit zu geringer Probenfläche oder anderen Abweichungen von den Vorgaben der Messnorm präsentiert. Die Nutzer derartiger Prüfzeugnisse, wie Architekten, Innenarchitekten, Bauherren, Planer etc., sollten nicht zögern, bei Unklarheiten direkt bei den Erstellern der Prüfzeugnisse entsprechend nachzufragen.

Häufige Fehler in Prüfberichten sind fehlende Angaben zum Aufbau der Prüfobjekte, wie Unklarheiten bei der Ermittlung der Prüffläche S . Selbst namhafte Hersteller verfügen teilweise nur über Prüfzeugnisse aus nicht normgerechten Hallräumen oder mit fragwürdigen Angaben zum Aufbau. Messberichte sollten generell nachvollziehbar und plausibel sein.

Äquivalente Schallabsorptionsfläche nach DIN EN ISO 354**Auftraggeber:** Beispielfirma**Objekt:**

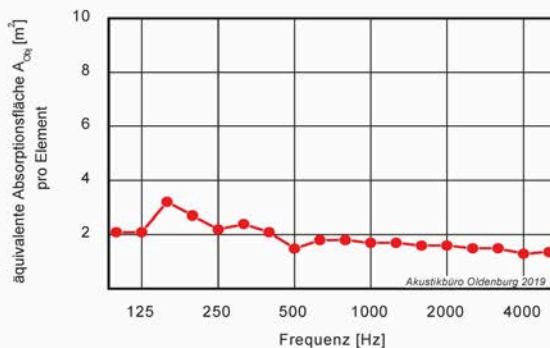
Beispielfirma Möbelsystem, Aktenschränk

Foto des Messaufbaus:**Aufbau:**

- 3 Schrankelemente (jeweils 1800 x 750 x 400 mm³)
- perforiert
- leer
- frei im Hallraum stehend.

Äquivalente Absorptionsfläche A_{Obj} eines Elements

Frequenz [Hz]	A_{Obj} [m ²]
100	2,1
125	2,1
160	3,2
200	2,7
250	2,2
315	2,4
400	2,1
500	1,5
630	1,8
800	1,8
1000	1,7
1250	1,7
1600	1,6
2000	1,6
2500	1,5
3150	1,5
4000	1,3
5000	1,4

**Hallraum:** ITAP GmbH⁽¹⁾**Prüfdatum:** 01.03.2019**Volumen:** 200 m³**Temperatur:** 19°C / 19°C⁽²⁾**Luftfeuchtigkeit:** 69 % / 70%⁽²⁾¹ Angaben zum Hallraum können bei den Autoren dieses Berichts bzw. der ITAP GmbH in Oldenburg angefordert werden² Leermessung / Messung mit Prüfling**Akustikbüro Oldenburg**

Dr. Christian Nocke

Bericht Nr. 2019/0007_0816

Oldenburg, 01. März 2019

Unterschrift:

Timo Meyer

Abbildung 3.12 Prüfzeugnis zu einer Hallraummessung eines Schrankmöbels mit Angabe der äquivalenten Absorptionsfläche A_{Obj}

3.5.3 Weitere Messverfahren

In-situ Messverfahren zur Absorption

Neben den beiden unter Ziffer 3.5.1 (Kundtsches Rohr) und 3.5.2 (Hallraum) genannten Verfahren finden sich in der Literatur zahlreiche sogenannte »Freifeld-Messverfahren« für den Absorptionsgrad bzw. die Impedanz von Materialoberflächen. Die Impedanz oder auch der Wellenwiderstand ist eine sehr grundlegende Kenngröße zur akustischen Charakterisierung von Materialien. Vielen dieser Verfahren ist gemeinsam, dass sie auf der Annahme ebener Wellenfronten bzw. Schallstrahlen basieren. Somit können sie als geometrische Verfahren bezeichnet werden (s.a. [32, dort § 24]). Speziell die in den letzten Jahren entwickelten Varianten zur Anwendung in-situ versuchen mit teilweise recht aufwändigen Verfahren zur Messdatenaufbereitung, den Absorptionsgrad α direkt im Freifeld zu messen. Einer der ersten Vorschläge zur Messung der akustischen Eigenschaften eines Materials im Freifeld ist die sogenannte Kurztzontmethode von Spandöck [177] aus dem Jahre 1934. Eine Übersicht verschiedener in-situ Messverfahren ist in der Dissertation des Autors [157] und in der entsprechenden Fachliteratur [94, 147, 155, 156] zu finden.

Messung eines effektiven Absorptionsgrades

Ein speziell auf sehr tiefe Frequenzen (kleiner 100 Hz) ausgerichtetes Messverfahren ist 1937 von L. und H. Cremer in [28] vorgeschlagen worden. Ein kleiner Hallraum wird hierbei mittels eines Sinussignals bei seinen Eigenfrequenzen angeregt. Nach Ausschalten der Quelle wird der Abklingvorgang bei dieser Frequenz registriert.

Zur Unterscheidung von der klassischen Methode mit breitbandiger Anregung des Raums werden die Begriffe Nachklingen des Raums sowie Nachklingzeit für diese monofrequenten Messungen verwendet [33]. Analog dem Vorgehen beim Hallraum-Messverfahren wird im leeren und mit Prüfling belegten Raum der Nachklingvorgang ausgewertet. Aus der Differenz der Nachklingzeiten lässt sich auf diese Art ein Absorptionsgrad bei dieser Frequenz, in [204, 205] als effektiver Absorptionsgrad α_{eff} definiert, bestimmen. Der effektive Absorptionsgrad ist von der Frequenz, der Positionierung der untersuchten Absorber im Raum und den Absorbern selbst abhängig. Wird nur eine dieser Einflussgrößen, z. B. der Absorberaufbau, verändert, eignet sich der effektive

Absorptionsgrad für Vergleiche verschiedener Absorbertypen. Er wurde daher als Hilfsmittel bei der Entwicklung von Tieffrequenz-Absorbern eingesetzt [176]. Der Begriff *effektiv* bezieht sich hier auf dieses spezielle Messverfahren bei den Eigenfrequenzen des jeweiligen Raums.

Auch Maa [132] spricht 1940 von einer effektiven Absorption und bezieht sich hierbei auf den Einfluss der Absorberpositionierung im Raum beim Nachhallvorgang.

Messung des Streugrades

Der Hallraum, siehe Abschnitt 3.5.2, kann neben der Messung der Absorption auch zur Bestimmung eines Streugrades für statistischen Schalleinfall verwendet werden. Zumindest unter Raumakustikern ist allgemein bekannt, dass erst durch eine angemessene Streuung des Schalls an Oberflächen ein Grad an Diffusität des Schallfeldes im Raum erreicht wird, der notwendig ist, um eine »gute Akustik« zu erzielen.

Mit der DIN EN ISO 17497-1 [106] steht eine Methode zur Verfügung, um zumindest für nicht hoch absorbierende und strukturierte Oberflächen den Streugrad für statistischen Schalleinfall zu bestimmen. Der Absorptionsgrad α_S des Materials soll kleiner als 0,5 sein. Die zu untersuchende Probe wird auf einem sogenannten Drehteller aufgebracht. Insgesamt werden vier Nachhallmessungen nach der Hallraummethode der DIN EN ISO 354 [72] durchgeführt. Zum einen wird die Nachhallzeit T_1 des leeren Raums mit Drehteller gemessen; anschließend wird zur Messung der Nachhallzeit T_2 die Probe auf den Drehteller gelegt und nochmals die Nachhallzeit bestimmt. Diese beiden Messungen ohne und mit Probe werden dann mit rotierendem Drehteller wiederholt, entsprechend erhält man die Nachhallzeiten T_3 und T_4 .

Analog dem Vorgehen gemäß Gleichung 3.5 wird mit Hilfe von T_2 und T_1 der Schallabsorptionsgrad α_S der nicht-rotierenden Probe ermittelt. Die Auswertung der Nachhallzeiten T_3 und T_4 der rotierenden Probe liefert den spiegelnden Absorptionsgrad (engl.: specular absorption coefficient) α_{spec} . Aus den Werten von α_S und α_{spec} kann der Streugrad s für statistischen Schalleinfall bestimmt werden. Es gilt:

$$s = 1 - \frac{1 - \alpha_{\text{spec}}}{1 - \alpha_S} \quad 3.7$$

Idealerweise sollte die Nachhallzeit T_1 und T_3 gleich sein. Sofern der Drehteller zur Halterung der Probe allerdings ebenfalls Streuung im Hallraum auslöst, lässt sich aus dieser Differenz der zugehörige Streugrad des Drehtellers bestimmen. Diese »Rest-«Streuung ist als Messfehler zu interpretieren.

Die Messung des Streugrades s für statistischen Schalleinfall ist in der Praxis noch wenig erprobt. Die Entwicklung des Verfahrens wurde weitestgehend an verkleinerten Modellen im Modellmaßstab durchgeführt.

Eine weitaus häufiger angewandte Methode zur quantitativen Bestimmung der Streuung von Oberflächen ist mit dem Verfahren nach Cox / D'Antonio [27] in Form einer Norm, der DIN EN ISO 17497-2 [107], fixiert. Bei dieser Methode werden die Reflexionen an der Probe unter verschiedenen Einfallswinkeln untersucht. Durch eine ausgeklügelte Signalverarbeitung können aus den gemessenen Impulsantworten für die ungestörte Ausbreitung des Schalls sowie aus der Schallausbreitung mit der Reflexion an der strukturierten Probe für die verschiedenen Einfallswinkel die richtungsabhängigen Streugrade bestimmt werden. Analog dem theoretischen Vorgehen beim richtungs- bzw. winkelabhängigen Absorptionsgrad kann anschließend durch die Bildung des Mittelwerts über alle Einfallswinkel der Streugrad für statistischen Schalleinfall bestimmt werden.

3.6 Kenngrößen der Schallabsorption

Für verschiedene Anwendungsbereiche werden aus den Messungen zur Schallabsorption diverse Kenngrößen abgeleitet. Diese Kenngrößen dienen in der Regel einer Vereinfachung der Beschreibung des jeweiligen Materials oder gehen auf bestimmte Raumzustände ein, die durch das jeweilige Material erreicht werden sollen. Auf die wichtigsten in der Praxis verwendeten Kenngrößen wird im Folgenden eingegangen.

3.6.1 Äquivalente Absorptionsfläche

Der Begriff der äquivalenten Absorptionsfläche wird in der Raumakustik in verschiedenen Zusammenhängen verwendet. Dies führt ab und an zu Verwirrungen und Verwechslungen, da die äquivalente Absorptionsfläche sowohl als

Kenngröße für die Schallabsorption von Schallabsorbern als auch als Kenngröße für Räume verwendet wird. Die äquivalente Absorptionsfläche eines Raums kann aus der Absorption der Flächen und Gegenstände im Raum abgeleitet werden. Diese verschiedenen Bedeutungen werden im Folgenden angeführt.

Für die Wirkung von schallabsorbierenden Materialien und Gegenständen sind die beiden folgenden Definitionen aus DIN 18041 [52] gebräuchlich:

Äquivalente Absorptionsfläche eines Einzelobjekts

Die äquivalente Absorptionsfläche eines Einzelobjekts A_{obj} nach Ziffer 3.12 in [52], siehe Gleichung 3.6 unter Ziffer 3.5.2, beschreibt die absorbierende Wirkung eines solchen Elements. Sind mehrere Objekte, wie Stühle oder Schränke, in einem Raum vorhanden, ist A_{obj} mit der Anzahl der Objekte zu multiplizieren, um so die äquivalente Gesamt-Absorptionsfläche der Objekte zu erhalten.

Äquivalente Absorptionsfläche eines flächenhaften Absorbers

Die Wirkung eines flächenhaften Absorbers in einen Raum wird durch die eingebrachte äquivalente Absorptionsfläche A_{eq} des Absorbers beschrieben. Die äquivalente Absorptionsfläche A_{eq} ergibt sich als Produkt des Absorptionsgrads α_S der Fläche nach Gleichung 3.5 und deren tatsächlicher Größe S im betrachteten Raum, also $A_{\text{eq}} = \alpha_S \times S$.

Sowohl die äquivalente Absorptionsfläche eines Objekts A_{obj} als auch die äquivalente Absorptionsfläche A_{eq} eines flächenhaften Schallabsorbers sind frequenzabhängige Größen. Nach DIN EN ISO 354 [72] wird die Absorptionsfläche in den Terzbändern von 100 Hz bis 5 000 Hz bzw. den Oktaven von 125 Hz bis 4 000 Hz angegeben. Der Absorptionsgrad α_S entspricht der Absorptionsfläche eines Quadratmeters des entsprechenden Materials.

25 m² eines Schallabsorbers mit einem Absorptionsgrad α_S von 0,36 bei 500 Hz führen zu einer äquivalenten Absorptionsfläche von $0,36 \times 25 \text{ m}^2 = 9,0 \text{ m}^2$. Diese äquivalente Absorptionsfläche kann ebenfalls von einem 100 m² großen Schallabsorber mit einem Absorptionsgrad α_S von 0,09 oder auch einer 12 m² großen Absorberfläche mit $\alpha_S = 0,75$ erreicht werden.

Durch das Konzept der äquivalenten Absorptionsfläche werden die verschiedenen Schallabsorber, egal ob Einzelobjekte wie Stühle oder Schränke oder aber flächige Schallabsorber wie Akustikdecken oder Bodenbeläge, miteinander vergleichbar.

Ein Stahlmöbel mit perforierten und damit schallabsorbierenden Frontflächen besitzt bei 500 Hz eine äquivalente Absorptionsfläche A_{obj} von $1,2 \text{ m}^2$. Eine schallabsorbierende Decke mit einem Absorptionsgrad α_S von 0,60 bei 500 Hz liefert bei einer Fläche von 2 m^2 ebenfalls eine äquivalente Absorptionsfläche von $1,2 \text{ m}^2$.

Äquivalente Absorptionsfläche eines Raums

Für die Akustik eines Raums ist die Summe aller äquivalenten Absorptionsflächen im Raum die maßgebliche Größe. Für diese raumbezogene Bedeutung der äquivalenten (Gesamt-)Absorptionsfläche wird in diesem Buch die Abkürzung A verwendet. Dies entspricht der Definition in der Ausgabe 2016 von DIN 18041 [52]. Auf die Bestimmung von A aus den einzelnen äquivalenten Absorptions-Teilflächen der im Raum vorhandenen Schallabsorber (Einzelobjekte und flächigen Schallabsorber) wird in Kapitel 6, dort Gleichung 6.3, eingegangen.

Streng genommen ist in der Raumakustik somit die äquivalente Absorptionsfläche A eines Raums deutlich von der äquivalenten Absorptionsfläche eines einzelnen Objekts (A_{obj}) oder eines flächigen Schallabsorbers (A_{eq}) mit einer definierten Fläche (S) zu unterscheiden. Diese Differenzierung erfolgt in der Praxis nicht immer und führt daher immer wieder zu Verwirrungen. In der Regel ergibt sich aus dem jeweiligen Zusammenhang, in welcher Bedeutung der Begriff verwendet wird. Seit der Neufassung von DIN 18041 [52] im Jahr 2016 sind die Begriffe eindeutig definiert.

Als Kenngröße der Schallabsorption von nicht-flächigen Absorbern ist die äquivalente Absorptionsfläche von Objekten A_{obj} zu verwenden. Ein entsprechendes Prüfzeugnis ist beispielhaft in Abbildung 3.12 dargestellt. Im Anhang 8.1 sind weitere Tabellen mit äquivalenten Absorptionsflächen von Objekten zu finden.

3.6.2 Bewerteter Schallabsorptionsgrad

Mit DIN EN ISO 11654 [66] wurde ein Verfahren eingeführt, das auf der Grundlage einer Messung des Schallabsorptionsgrades α_s nach DIN EN ISO 354 [72] die Ableitung einer Einzahlangabe zur Schallabsorption beschreibt. Es handelt sich um ein mehrstufiges Vorgehen, das schließlich zur Angabe des bewerteten Schallabsorptionsgrades α_w führt.

Die Einzahlangabe zur Absorption mit Hilfe des bewerteten Schallabsorptionsgrads α_w kann zur Formulierung von Anforderungen an schallabsorbierende Produkte und auch zur Beschreibung von akustischen Produkteigenschaften verwendet werden. Für akustische anspruchsvolle Umgebungen wird schon im Anwendungsbereich der Norm darauf hingewiesen, dass die Bewertung mit α_w nicht ausreichend ist, sondern in solchen Fällen, die ohnehin einen raumakustischen Entwurf erfordern, die vollständige frequenzabhängige Schallabsorptionskurve anzuwenden ist.

Zur Bestimmung des α_w -Wertes wird zunächst aus den 18 Terzwerten des Schallabsorptionsgrades α_s zwischen 100 Hz und 5 000 Hz nach DIN EN ISO 354 [72] für die sechs Oktavbänder zwischen 125 Hz und 4 000 Hz der sogenannte praktische Schallabsorptionsgrad α_p ermittelt. Für jedes Oktavband i ist dazu der arithmetische Mittelwert des Schallabsorptionsgrads der drei Terzbänder innerhalb der Oktave zu bilden. Dieser Mittelwert wird mit zwei Nachkommastellen berechnet und mathematisch auf ein Vielfaches von 0,05 gerundet. Die nach DIN EN ISO 354 möglichen Werte $\alpha_s \geq 1,00$ können zu α_p -Werten größer als 1,00 führen. Diese Werte werden nach Vorgabe der Norm auf $\alpha_p = 1,00$ begrenzt, was auch aus physikalischer Sicht sinnvoll ist.

Zur Bestimmung des α_w -Wertes werden die α_p -Werte mit einer in der Norm definierten Bezugskurve verglichen. Die Bezugskurve ist für die fünf Oktaven zwischen 250 Hz und 4 000 Hz vorgegeben, siehe Abbildung 3.13. Wenn der α_p -Wert niedriger ist als der Wert der Bezugskurve (im jeweiligen Oktavband), liegt eine ungünstige Abweichung vor. Die Bezugskurve wird in Schritten von 0,05 zu niedrigeren Werten verschoben, bis die Summe der ungünstigen Abweichungen kleiner oder gleich 0,10 ist. Der 500 Hz-Wert der auf diese Art verschobenen Bezugskurve definiert den Wert des bewerteten Schallabsorptionsgrads α_w . In Abbildung 3.13 ist die Anwendung des Verfahrens skizziert.

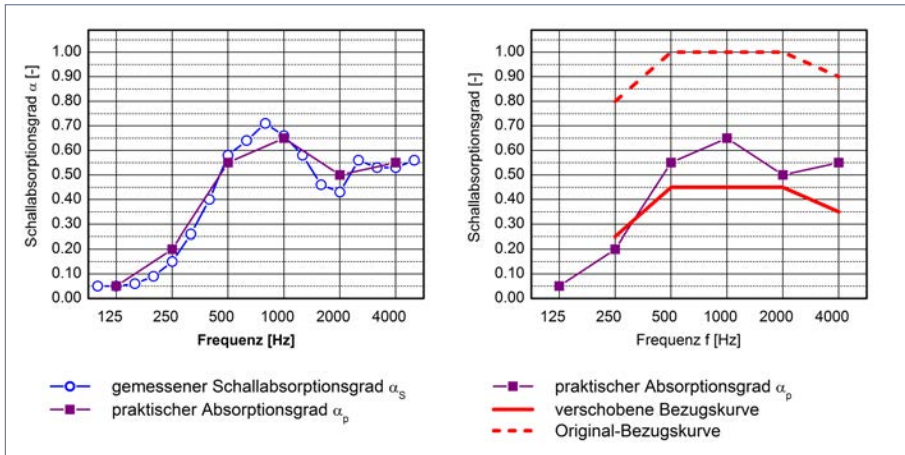


Abbildung 3.13 Ableitung des bewerteten Schallabsorptionsgrads α_w aus den gemessenen Absorptionswerten α_s mit Hilfe der daraus ermittelten Werte des praktischen Absorptionsgrads α_p

In diesem Fall ergibt sich ein Wert von 0,45 für den bewerteten Schallabsorptionsgrad α_w .

Neben der Angabe des α_w -Wertes müssen sogenannte Formindikatoren, mit »L«, »M« oder »H« bezeichnet, angegeben werden, wenn ein Wert des praktischen Schallabsorptionsgrads α_p die verschobene Bezugskurve um 0,25 oder mehr überschreitet, Beispiel: $\alpha_w = 0,65(\text{MH})$. Der Formindikator »L« wird verwendet, wenn die Überschreitung bei 250 Hz, »M«, wenn die Überschreitung bei 500 Hz oder 1000 Hz und »H«, wenn sie bei 2000 Hz oder 4000 Hz auftritt. In der Norm wird angemerkt, dass Anwender grundsätzlich die vollständige Schallabsorptionskurve verwenden sollen, wenn ein Formindikator auftritt. Die Vergabe eines Formindikators bedeutet, dass der Schallabsorptionsgrad bei einer oder mehreren Frequenzen wesentlich über der verschobenen Bezugskurve liegt. Nach Hinweis der Norm sollte immer, wenn ein Formindikator zu verwenden ist, der folgende Satz im Prüfzeugnis angeführt werden: »Es wird eindringlich empfohlen, diese Einzahlbewertung in Verbindung mit der vollständigen Kurve des Schallabsorptionsgrads zu verwenden, die auf Anforderung erhalten werden kann«.

Hierzu ist anzumerken, dass viele Prüfzeugnisse, die eine Einzahlangabe anführen, ohnehin auch die vollständigen Schallabsorptionskurven und Angaben nach DIN EN ISO 354 [72] enthalten. Die aktuell gültige Fassung der DIN EN ISO 11654 [66] aus dem Jahr 1997 verweist noch auf die Vorgänger-Fassung (DIN EN 20354) der jetzt gültigen DIN EN ISO 354 aus dem Jahr 1993. Durch die Neufassung der DIN EN ISO 354 [72] im Jahr 2003 sind einige der Hinweise zu den Aufbauten der Proben nicht mehr notwendig. Die aktuelle Überarbeitung der DIN EN ISO 354 [72] greift verschiedene weitere Aufbauten auf. Wann eine Neufassung erscheinen wird, ist derzeit nicht absehbar.

Schallabsorberklasse	α_w -Werte	verbale Beschreibung (nach VDI 3755)
A	0,90; 0,95; 1,00	höchst absorbierend
B	0,80; 0,85	höchst absorbierend
C	0,60; 0,65; 0,70; 0,75	hoch absorbierend
D	0,30; 0,35; 0,40; 0,45; 0,50; 0,55,	absorbierend
E	0,15; 0,20; 0,25	gering absorbierend
nicht klassifiziert*	0,00; 0,05; 0,10	reflektierend
*in VDI 3755 als Schallabsorberklasse F bezeichnet		

Tabelle 3.3 Schallabsorberklassen nach informativem Anhang B der DIN EN ISO 11654 [66] sowie die Einstufung bzw. verbale Beschreibung der Absorption für abgehängte Unterdecken nach VDI 3755 [195]

Im informativen Anhang B der DIN EN ISO 11654 [66] wird eine in der Praxis häufig anzutreffende Klassifizierung in Schallabsorberklassen angegeben. Verschiedene Wertebereiche des bewerteten Schallabsorptionsgrads α_w werden zu Schallabsorberklassen zusammengefasst, siehe Tabelle 3.3. Die Schallabsorberklassen werden ebenfalls in der Richtlinie VDI 3755 »Schalldämmung und Schallabsorption abgehängter Unterdecken« [195] aufgegriffen. Dort wird eine verbale Beschreibung zu den Klassen angeführt.

Im Entwurf zur Neufassung E DIN EN ISO 11654 [67] vom Mai 2018 ist der informative Anhang B ersatzlos gestrichen worden. Damit werden die Schallabsorberklassen abgeschafft. Dieser Schritt wurde im entsprechenden ISO-Gremium intensiv diskutiert. Der vielfache Missbrauch der Klassifizierung, beispielsweise bei der Bewertung der Absorption von Einrichtungsgegenständen, würde somit gestoppt. Zu erwähnen ist weiterhin der neue Titel: »Schallabsorber – Bewertung von Schallabsorptionsgraden«. Dies dokumentiert, dass lediglich eine Bewertung der absorbierenden Wirkung von flächigen Absorbern vorgenommen wird. Gegenüber der Ausgabe aus dem Jahr 1997 wird in einem weiteren Abschnitt mit der Überschrift » α_w -Werte und Tieffrequenzabsorption« die Absorption anhand des α_p -Wertes bei 125 Hz beschrieben. Es wird angeführt, dass neben den oben genannten Formindikatoren in Klammern der α_p -Wert für 125 Hz angegeben werden kann, Beispiel: $\alpha_w = 0,65(\text{MH})(\alpha_{p125} = 0,15)$. Der hier beschriebene Entwurf aus dem Jahr 2018 wurde abgelehnt und zurückgezogen, sodass die veraltete Fassung dieser Norm aus dem Jahr 1997 auch weiterhin gilt und zu Missbrauch und Konfusion führen wird.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Einzahlbewertung der DIN EN ISO 11654 [66] anhand des bewerteten Schallabsorptionsgrads α_w eine starke Vereinfachung darstellt. Diese sehr überschlägige Betrachtung hat ihre Bedeutung bei der Beschreibung von flächenhaften Schallabsorbern und kann hilfreich bei einer Vorauswahl bestimmter Produkte sein. Raumakustische Planungen sollten jedoch immer anhand der frequenzabhängigen α_p -Werte erfolgen. Bei der Verwendung des Einzahlwerts α_w für raumakustische Planungen werden in der Regel zu starke Vereinfachungen getroffen. In Bezug auf die frequenzabhängigen Anforderungen, wie in DIN 18041 [52] in Abschnitt 5.2.1 beschrieben, besteht ein Widerspruch zu den Anforderungen in sechs Oktavbändern zwischen 125 Hz und 4 000 Hz sowie der Bezugskurve zur Bewertung der Schallabsorption in lediglich fünf Oktavbändern zwischen 250 Hz und 4 000 Hz.

Auch vor dem Hintergrund der Genauigkeit des Hallraumverfahrens mit Abweichungen von bis zu $\pm 0,05$ für den Schallabsorptionsgrad α_s in einzelnen Oktavbändern ist die Klassifizierung in Stufen von 0,05 zu hinterfragen, siehe Wittstock [202].

3.6.3 NRC und SAA

Speziell im anglo-amerikanischen Raum ist nicht die Einzahlbewertung anhand des bewerteten Schallabsorptionsgrads α_w verbreitet, sondern es wird als Einzahlwert der seit Langem bekannte NRC-Wert (NRC = »Noise Reduction Coefficient«) verwendet. Da gerade im internationalen Umfeld diese alternative Einzahlbewertung zur Beschreibung schallabsorbierender Produkte verwendet wird, soll diese im Folgenden kurz dargestellt werden.

Die maßgebliche Norm zur Ermittlung des NRC ist die ASTM 423 [11], die in der aktuell gültigen Fassung nur noch indirekt auf den NRC-Wert verweist und streng genommen inzwischen den SAA-Wert (SAA = »Sound Absorption Average«) eingeführt hat. Anders als die DIN EN ISO 354 [72], eine reine Messvorschrift, und die DIN EN ISO 11654 [66] als Norm mit einem darauf basierenden Bewertungsverfahren, beschreibt die ASTM 423 [11] sowohl das Verfahren zur Messung als auch zur Bewertung der Schallabsorption.

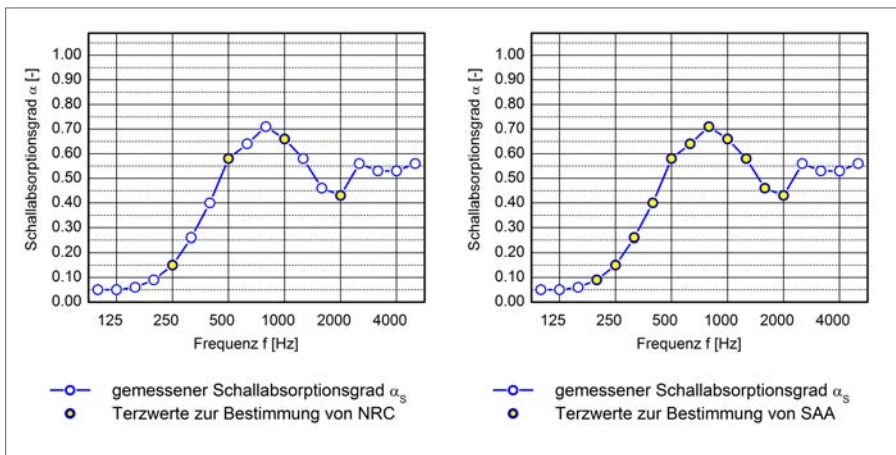


Abbildung 3.14 Zur Bestimmung von NRC und SAA nach [11] verwendete Terzwerte des Schallabsorptionsgrads α_s

Der SAA-Wert wird aus den zwölf Terzwerten des Schallabsorptionsgrades von 200 Hz bis 2 000 Hz als arithmetischer Mittelwert gebildet, der dann auf 0,01 genau gerundet wird, siehe Abbildung 3.14. Der NRC-Wert wird aus lediglich vier Terzwerten (250 Hz, 500 Hz, 1 000 Hz und 2 000 Hz) ermittelt. Es

wird ebenfalls der arithmetische Mittelwert gebildet und dann auf ein Vielfaches von 0,05 gerundet. In der aktuell gültigen ASTM 423 wird darauf hingewiesen, dass NRC-Werte zur besseren Vergleichbarkeit mit der vorherigen Fassung der Norm angegeben werden sollten. Auf Unterschiede und Gemeinsamkeiten zwischen der DIN EN ISO 354 [72] und der ASTM 423 [11] in den Details der Messdurchführung kann im Rahmen dieses Buchs nicht eingegangen werden.

3.6.4 Absorption von Einzelobjekten

Die akustische bzw. genauer raumakustische Wirkung von Materialien und Objekten wird durch Messung der Schallabsorption nach den Vorgaben der DIN EN ISO 354 »Messung der Schallabsorption in Hallräumen« [72] ermittelt. Die Ergebnisse von Messungen nach der DIN EN ISO 354 werden als Absorptionsgrad α_S für flächige Absorber oder als Absorptionsfläche eines Objekts A_{obj} angegeben. In der Regel ist die Eingabe der Absorptionsfläche A_{obj} in den Programmen zur Raumakustiksimulation nicht vorgesehen, siehe Abschnitt 6.7. Sämtliche Raumbegrenzungsflächen, aber auch die Einrichtungsgegenstände, werden in der Computersimulation durch ebene Flächen angenähert. Um auch die akustische Wirkung von Einzelobjekten, wie schallabsorbierende Stellwände, Schränke oder »Akustiksegel«, berücksichtigen zu können, ist es notwendig, den Flächen dieser Objekte einen Absorptionsgrad zuzuordnen. Hierbei bietet es sich an, dass aus der Absorptionsfläche A_{obj} ein auf die Gesamt-Oberfläche einer vereinfachten Geometrie des Einzelobjekts bezogener Absorptionsgrad bestimmt wird.

Dieser Absorptionsgrad wird im Folgenden mit α_{obj} bezeichnet, siehe auch [158] oder [160]. Damit soll deutlich gemacht werden, dass es sich um einen anderen Wert als beispielsweise den direkt messbaren α_S -Wert handelt. α_{obj} erfordert die Messung der äquivalenten Absorptionsfläche A_{obj} und zugleich eine Annahme zur vereinfachten Geometrie des Einzelobjekts mit einer eindeutig definierten Oberfläche der Größe S .

In der Norm ISO 20189 »Akustik – Stellwände und einzelne Objekte zur Verwendung in Innenräumen – Auslegung der Schallabsorption und Schalldämmung von Bauteilen aufgrund von Messungen im Prüfstand« vom November

2018 [108] wird im normativen Anhang B die Kenngröße α_{obj} eingeführt. Dort sind Beispiele zur Ermittlung der Kenngröße dargestellt.

Nach Anhang B in ISO 20189 ergibt sich der α_{S} -Wert wie folgt:

$$\alpha_{\text{obj}} = \frac{A_{\text{obj}}}{S} \quad 3.8$$

In Abbildung 3.15 und nachfolgend ist beispielhaft dargestellt, wie die Fläche S anhand der vereinfachten Geometrie ermittelt wird.

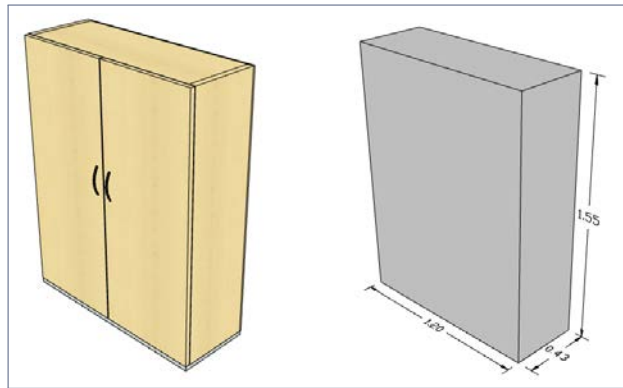


Abbildung 3.15 Skizze zur geometrischen Vereinfachung von Einzelobjekten

Ein Schrank mit den Maßen von 1,20 m \times 1,55 m \times 0,43 m, siehe Abbildung 3.15, besitzt eine im Hallraum gemessene Absorptionsfläche A_{obj} wie folgt:

Frequenz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
A_{obj}	1,93m ²	2,10m ²	2,60m ²	1,59m ²	1,32m ²	1,31m ²

Bei einer Gesamtoberfläche S der sechs Teilflächen der vereinfachten Geometrie im Raumakustikmodell,

$S = 2 \times 1,20 \text{ m} \times 1,55 \text{ m} + 2 \times 1,55 \text{ m} \times 0,43 \text{ m} + 2 \times 1,20 \text{ m} \times 0,43 \text{ m} = 6,10 \text{ m}^2$
 ergeben sich folgende Werte für den Schallabsorptionsgrad α_{obj} :

Frequenz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
α_{obj}	0,31	0,34	0,42	0,26	0,22	0,21

Im ebenfalls normativen Anhang E von ISO 20189 werden neun Aufbauvarianten zur Messung von Objekten vorgestellt. Neben Schallschirmen auf Schreibtischen, Stellwänden, frei hängenden Objekten und Sitzmöbeln werden auch Schränke und die jeweils zugehörige Positionierung zur Messung im Hallraum (siehe Abschnitt 3.5.2) dargestellt, siehe Tabelle 3.4. Die Messung der äquivalenten Absorptionsfläche A_{obj} erfolgt nach Vorgabe in DIN EN ISO 354 [72] und wird um die Hinweise zu den verschiedenen Aufbauvarianten ergänzt.

Bei der Messdurchführung nach ISO 20189 wird für alle Aufbautypen jeweils ein Vorschlag dargestellt. Hierbei wird Bezug auf die Aufbautypen nach DIN EN ISO 354 (siehe Tabelle 3.2) genommen. Generell sollte die äquivalente Absorptionsfläche im Hallraum größer als 1 m^2 und kleiner als 12 m^2 sein.

Die in Tabelle 3.4 dargestellten Aufbautypen sind ISO 20189, Anhang E.1 entnommen. Im Anhang E.2 wird die Messung von Einzelobjekten, die fest zu einer Oberfläche gehören bzw. damit verbunden sind, beschrieben. Die Mindestgröße beträgt 10 m^2 . Dazu wird unter E.2.1 für Boden- oder Wandbeläge, die eine Fläche von mehr als 10 m^2 belegen, auf den Typ A nach DIN EN ISO 354 verwiesen. Für entsprechend große Vorhänge, Vorhangstoffe oder auch miteinander verbundene Elemente oder Paneele wird der Aufbautyp G-100 nach DIN EN ISO 354 vorgeschlagen und darauf hingewiesen, dass auch andere Abstände gemessen werden können, die idealerweise ein Vielfaches von 50 mm betragen. Unter Ziffer E.2.3 wird für mobile Trennwände mit absorbierenden Oberflächen empfohlen, diese in einer Wand eingebaut oder aber vor einem 1.000 mm starken Hohlraum zu messen.

Immer wenn für nicht-flächige Schallabsorber Computermodelle zur Simulation verwendet werden, ist eine derartige Festlegung, wie hier durch α_{obj} beschrieben, notwendig. Hersteller und Händler von Büro-Ausstattungen haben inzwischen begonnen, akustisch wirksame Produkte mit Hilfe von α_{obj} zu beschreiben, um so eine effiziente Übernahme in entsprechende Computerprogramme zu ermöglichen.

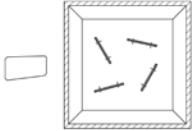
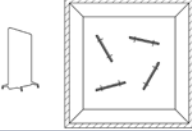
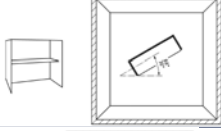
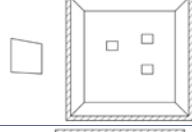
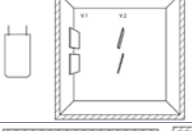
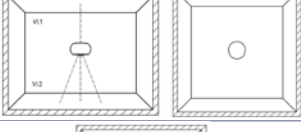
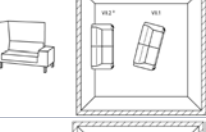
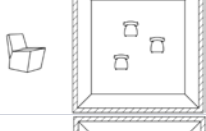
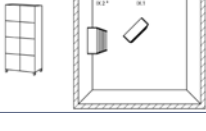
Aufbau	Skizze	typische Aufbauten
Typ I		Schreibtischaufsätze
Typ II		Stellwände auf Boden stehend
Typ III		Möbelanordnungen
Typ IV		Einzelabsorber in Wandmontage
Typ V		Einzelabsorber in Hängemontage
Typ VI		Volumenelemente
Typ VII		Sitzmöbel
Typ VIII		Stühle, Container, Hocker
Typ IX		Regale und Schränke

Tabelle 3.4 Aufbautypen für Prüfobjekte und Beispiele gemäß normativem Anhang B von ISO 20189 [108]

3.6.5 Weitere Kenngrößen der Schallabsorption

In den Technischen Regeln zur Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung, speziell in Teil 3 [186] (kurz TRLV Lärm 3), wird in Abschnitt 4.3 zur lärm mindernden Gestaltung und Einrichtung von Arbeitsstätten und Arbeitsplätzen wie auch in der Technischen Regel für Arbeitsstätten ASR A3.7 »Lärm« (kurz ASR A3.7) [179] der mittlere Schallabsorptionsgrad $\bar{\alpha}$ zur akustischen Charakterisierung eines Raums verwendet. Wie in Kapitel 6 gezeigt wird, hängen das Schallabsorptionsvermögen der Raumbegrenzungsflächen bzw. aller Oberflächen im Raum und der Wert des Schallpegels im Raum voneinander ab. Wie bei der äquivalenten Absorptionsfläche besteht hier eine gewisse Verwechslungsgefahr, da der über die Oberflächen im Raum gemittelte Schallabsorptionsgrad $\bar{\alpha}$ streng genommen eine Materialeigenschaft beschreibt.

In der TRLV Lärm 3 wird beschrieben, dass der Stand der Technik als eingehalten gelten kann, wenn der über alle relevanten Flächen gemittelte Schallabsorptionsgrad $\bar{\alpha}$ in den Oktavbändern mit den Mittenfrequenzen von 500 Hz bis 4 000 Hz mindestens 0,3 beträgt. Der mittlere Absorptionsgrad $\bar{\alpha}$ bezieht sich somit im Sinne der TRLV Lärm 3 auf einen Frequenzmittelwert der vier Oktaven von 500 Hz bis 4 000 Hz. Anzumerken ist, dass nach TRLV Lärm 3 lediglich von sechs Raumbegrenzungsflächen ausgegangen wird. Dies zeigt die sehr überschlägige Art der Betrachtung.

Abweichend zur TRLV Lärm 3 wird in der ASR A3.7 ein Frequenzmittelwert der vier Oktaven von 250 Hz bis 2 000 Hz verwendet. Weiterhin werden in der ASR A3.7 auch weitere Flächen im Raum verwendet (Details siehe Kapitel 5.3). Auch diese vermeintlich genauere Betrachtung stellt eine Beschreibung einer Materialeigenschaft und nicht unbedingt einer Raumeigenschaft dar.

Für die Ermittlung des mittleren Schallabsorptionsgrads $\bar{\alpha}$ wird in beiden Technischen Regeln auf DIN EN ISO 354 [72] verwiesen, da nur anhand zuverlässig gemessener Absorptionswerte der mittlere Absorptionsgrad ermittelt werden kann.

4 Raumakustische Kenngrößen

Es existiert eine Vielzahl von raumakustischen Kenngrößen, die aus verschiedenen Motivationen heraus abgeleitet und eingeführt wurden. Bevor auf die verschiedenen Beschreibungsarten, wie die Nachhallzeit, die Sprachverständlichkeit und andere, eingegangen werden kann, sind einige grundlegende Überlegungen voranzustellen. Ohnehin werden in diesem Buch lediglich diejenigen Kenngrößen vertieft, die sich zur Behandlung der Räume des Alltags als praktisch relevant erwiesen haben.

Die raumakustischen Verhältnisse ergeben sich aus dem Raumvolumen, der Raumform sowie der Raumausstattung. Das Volumen sowie die Raumform, mithin die Kubatur, unterliegen weiteren gestalterisch-architektonischen Einflüssen, bestimmen aber auch die raumakustischen Bedingungen im Raum.

Der Schallpegel wird häufig zur Kennzeichnung der akustischen Bedingungen in einem Raum herangezogen, obwohl es sich nicht um eine Kenngröße des Raums allein handelt. Der Schallpegel wird von vielen weiteren Faktoren beeinflusst. Zunächst hängt der Pegel im Raum von dem Schalleintrag in den Raum von außen sowie den im Raum befindlichen Schallquellen ab. Dies ist im Wesentlichen eine Fragestellung der Bauakustik und der Ausstattung mit haustechnischen und anderen Geräten. Auch die wenig kontrollierbaren und nicht einer Prognose zugänglichen Geräusche der Nutzer tragen zum Pegel im Raum bei. Studien aus dem Bereich von Klassenräumen belegen, dass neben den raumakustischen Bedingungen auch Faktoren wie das pädagogische Konzept der Schule, die Gewohnheiten der Lehrer und Schüler, aber auch die Tagesform der Nutzer den Schallpegel, ausgedrückt zum Beispiel durch den äquivalenten Dauerschallpegel oder den Beurteilungspegel, stark beeinflussen können.

Prinzipiell können die raumakustischen Kenngrößen in zwei Gruppen unterteilt werden. Zum einen gibt es Kenngrößen, die sich auf den Raum als Gesamtheit beziehen. Diese Kenngrößen, beispielsweise die Nachhallzeit, kön-

nen als globale oder auch statistische Kenngrößen bezeichnet werden. Die zweite Gruppe raumakustischer Kenngrößen berücksichtigt auch die Konstellation von Schallquelle und -empfänger, wie Sprecher und Hörer, im Raum und zeigt eine ausgesprochene Positionsabhängigkeit. Entsprechende Kenngrößen wie der Sprachübertragungsindex können als lokale oder auch nicht-statistische Kenngrößen bezeichnet werden. Die zweite Gruppe von Kenngrößen ist in der Regel aufwändiger zu berechnen oder zu messen, da jeweils Sender- und Empfängerposition gesondert variiert und erfasst werden müssen.

4.1 Vorbemerkung – Raumgröße und Form

Vorab sei eine Kenngröße von Räumen erwähnt, die letztlich auch eine gewisse Bedeutung für die Räume des alltäglichen Lebens besitzt. Bei akustisch sehr anspruchsvollen Räumen, wie Konzertsälen, Opernhäusern etc., erfolgt die Festlegung der Kubatur idealerweise in Abstimmung mit den Erfordernissen der Akustik. Auch wenn dieser Aspekt für die in diesem Buch betrachteten Räume des alltäglichen Lebens nicht die oberste Priorität hat, ist es sinnvoll, auf die raumakustische Kenngröße zur allgemeinen Beschreibung von Räumen, die Volumenkenzahl, einzugehen. Weiterhin sind einige allgemeine Überlegungen zur Raumform voranzustellen. In den anschließenden Abschnitten 4.2 bis 4.4 werden die wichtigen Kenngrößen für die in diesem Buch betrachteten Raumtypen aufgezeigt.

Volumenkenzahl

Die Volumenkenzahl, abgekürzt k , wird üblicherweise in Kubikmeter (m^3) pro Platz angegeben. Von Hartmann [98] werden allgemein vier Bereiche der Volumenkenzahl unterschieden, um den Einfluss der Absorption durch die ohnehin im Raum vorhandenen Menschen zu berücksichtigen.

Geringe Volumenkenzahl

Bei 3 bis 4 m^3 pro Platz wird durch die Menschen im Raum ein hoher Anteil der Absorption speziell bei hohen und mittleren Frequenzen in den Raum eingebracht. Es sind dann lediglich noch Tiefenabsorber notwendig, um die vorhandene Absorption durch die Menschen zu ergänzen. Zwischen besetztem und

unbesetztem Raum kommt es zu einer deutlichen Änderung der akustischen Bedingungen.

Mittlere Volumenkenzahl

Zwischen 4 und 6 m³ pro Person bzw. Platz sind in der Regel in geringem Maße weitere Absorber auch für den mittleren und hohen Frequenzbereich neben den ohnehin benötigten Absorbern für tiefe Frequenzen notwendig. Der überwiegende Teil der Absorption bei mittleren und hohen Frequenzen wird allerdings noch durch die Menschen in den Raum eingebracht.

Hohe Volumenkenzahl

Ab 6 bis 8 m³ pro Platz nimmt der prozentuale Anteil der Absorption durch die Menschen ab. In der Regel sind zusätzliche Schallabsorber für alle Frequenzbereiche notwendig. Anders als bei den geringeren Volumenkenzahlen dominiert die Absorption durch die Menschen nicht mehr.

Sehr hohe Volumenkenzahl

Bei mehr als 8 m³ pro Platz müssen immer zusätzliche Absorber in den Raum eingebracht werden, um die frequenzabhängige Nachhallzeit einzustellen. Der Einfluss der Absorption durch die Menschen im Raum ist eher nachrangig.

In DIN 18041 [52] werden die in der Tabelle 4.1 angegebenen Volumenkenzahlen angeführt. Diese Werte sollten angestrebt werden, um eine zur Raumnutzung passende Nachhallzeit zu erzielen. Weitere Empfehlungen und Hinweise zur Volumenkenzahl sind in der Tabelle 4.1 aufgeführt.

Bei deutlich größeren Volumenkenzahlen als in der Tabelle 4.1 angegeben können umfangreiche Maßnahmen zur Ausstattung des Raumes mit Schallabsorbern notwendig werden. Hierbei besteht dann die Gefahr, dass zugleich der Schallpegel zu stark reduziert wird, um alle Hörerorte im Raum ausreichend zu versorgen. Diese »Überdämpfung« ist allerdings in kleinen Räumen eher unkritisch, da hier aufgrund der geringen Distanzen zwischen Schallquelle und Hörort in der Regel ausreichend starker Direktschall ankommt. In größeren Räumen besteht die Möglichkeit, dass die notwendige Versorgung mit Schall aufgrund langer Laufwege und zu hoher Absorption nicht an allen Hörorten gelingt.

Eine Unterschreitung der Volumenkenzahl kann dazu führen, dass die erforderliche Nachhallzeit nicht erreicht werden kann. Bei einer Unterschreitung

Hauptnutzung des Raums	Volumenkennzahl k in m ³ pro Platz	maximales Volumen V in m ³
nach DIN 18041 [52]		
Sprachdarbietung	4 bis 6	
Musik- und Sprachdarbietung	6 bis 8	
Musikdarbietung	7 bis 12	
nach anderen Quellen [84, 98, 148]		
Klassenräume	3 bis 5	500
Vortragsraum	4 bis 6	
Versammlungsräume, Seminarräume	3 bis 5	1 000
Sprechtheater, Hörsäle, Plenarsäle, Kongressräume	4 bis 6	5 000
Mehrzwecksäle für Sprache und Musik	4 bis 7	8 000
Musiktheater (Oper und Operette)	5 bis 8	15 000
Kammermusiksäle	6 bis 10	10 000
Konzertsäle für sinfonische Musik	8 bis 12	25 000
Räume für Orgelmusik	10 bis 14	30 000

Tabelle 4.1 Volumenkennzahl für verschiedene Raumnutzungen

der Volumenkennzahl kann es vorkommen, dass trotz hoher Absorption im Raum der Schallpegel zu hoch bleibt. Die Schallenergiedichte bzw. der Schallpegel im Raum wird nicht ausreichend abgesenkt.

Nach DIN 18041 [52] werden in Proben- und Unterrichtsräumen für Musik bei einer ausreichend hohen Volumenkennzahl hohe mittlere Schalldruckpegel im Raum vermieden. Für kleinere solche Räume mit bis zu etwa zehn gleichzeitig Musizierenden soll die Volumenkennzahl 15 bis 20 m³ pro Person nicht unterschreiten, für größere Musikprobenräume sind Volumenkennzahlen von 30 bis 50 m³ pro Person anzustreben.

Raumform

Hinsichtlich der Raumform wird prinzipiell zwischen der Primärstruktur und der Sekundärstruktur unterschieden. Die Primärstruktur kann als die Kubatur oder auch Grobstruktur angesehen werden. Unter der Sekundärstruktur sind die auf den Raumbegrenzungsflächen angebrachten Materialien sowie die Ein-

richtungsgegenstände im Raum zu verstehen. Aus bautechnischer Sicht kann die Primärstruktur häufig als der Rohbau und die Sekundärstruktur als der raumbildende Innenausbau beschrieben werden. Idealerweise sind beide für die raumakustische Gestaltung eines Raums zu berücksichtigen.

Aus raumakustischer Sicht gibt es keine optimale oder ideale Raumform. Es gibt jedoch Raumformen als Primärstruktur, die grundsätzlich als raumakustisch ungünstig einzustufen sind und durch entsprechenden Mehraufwand in der Sekundärstruktur aufgefangen werden können. Insofern kann festgehalten werden, dass, abgesehen von wenigen Extremfällen, prinzipiell jeder Raum akustisch optimal gestaltet werden kann.

Die Räume des alltäglichen Lebens besitzen näherungsweise überwiegend die Form eines Quaders oder eine Kombination aus mehreren Quadern. Dies ist prinzipiell als günstig anzusehen und vereinfacht den Planungsaufwand.

Raumakustisch ungünstige Formgebungen wie Kugelausschnitte, Kuppeln, elliptische oder kreisförmige Schnitte in horizontaler oder vertikaler Richtung erfordern spezielle raumakustische Maßnahmen auf diesen Flächen. Eine Kuppeldecke in Form eines Kugelausschnitts führt bei schallharter Ausführung zu starken Fokussierungen. Ähnlich einem Brennpunkt in der Optik sind in der Akustik Zonen mit hohen Schallpegeln im Raum zu verzeichnen. Durch eine Ausstattung der ungünstigen Form mit Schallabsorbern kann der fokussierende Effekt einer solchen Form aufgelöst werden. Im Rahmen dieses Buches wird auf die Behandlung akustisch ungünstiger Raumformen nicht vertiefend eingegangen. Ausführliche Hinweise und Empfehlungen sind bei Fasold [85] oder auch Weiße [200] zu finden.

4.2 Nachhallzeit

Die Nachhallzeit eines Raums kann als die älteste raumakustische Kenngröße bezeichnet werden. Ursprünglich wurde die Nachhallzeit durch W.C. Sabine mittels Stoppuhr und subjektivem Höreindruck ermittelt. Sehr überschlägig kann die Nachhallzeit als die Zeitdauer beschrieben werden, die ein Schallereignis nach seiner Beendigung benötigt, bis es in einem Raum nicht mehr hörbar ist.

Technisch wird die Nachhallzeit als die Zeitspanne definiert, die der Schallpegel nach Beendigung der Schallfeldanregung benötigt, um um 60 dB abzusinken¹. Die Nachhallzeit bezieht sich auf die Änderung des Schallpegels nach Beendigung des eingeschwungenen Schallfeldes im Raum. Betrachtet man den Verlauf des Schallpegels, so ergibt sich eine weitgehend lineare Abnahme im Zeitverlauf, rechts in Abbildung 4.1. Wird hingegen die Abnahme des Schalldrucks über der Zeit aufgetragen, so ergibt sich eine exponentielle Abnahme, siehe Abbildung 4.1 links.

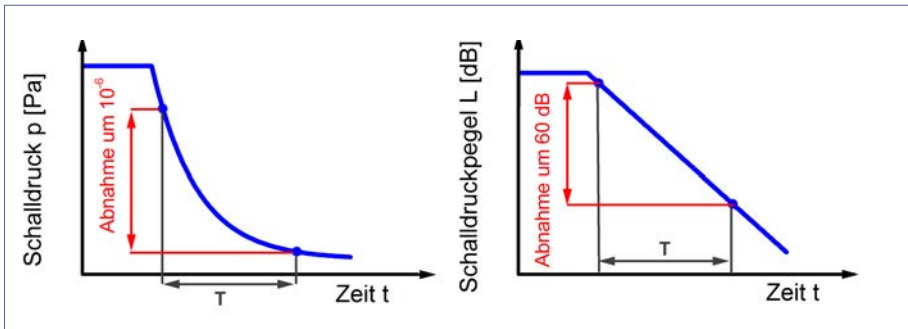


Abbildung 4.1 Definition und Darstellung der Nachhallzeit T: links als Abnahme des Schalldrucks und rechts als Abnahme des Schalldruckpegels über der Zeit

Die Abnahme des Schallpegels erfolgt in der Praxis bzw. in realen Räumen nie ideal linear, insofern werden bei messtechnischen Auswertungen in der Regel Ausgleichsgeraden in den Pegel-Zeit-Schrieb gelegt. Je steiler die Abnahme des Schalldruckpegels, desto kürzer die Nachhallzeit.

Als Nachhall kann auch die Summe aller Reflexionen in einem geschlossenen Raum angesehen werden. Nach dem Ausschalten einer Schallquelle »läuft« der Schall noch durch den Raum, sodass der Schalldruck erst nach einer gewissen Zeitdauer am jeweiligen Hör- oder Messpunkt abnimmt und irgendwann nicht mehr wahrgenommen wird.

In Abbildung 4.2 ist schematisch die Schallausbreitung im Raum in Verbindung mit dem sogenannten Echogramm, auch Raum-Impulsantwort genannt,

¹ Diese Definition anhand des Schalldruckpegels in der DIN 18041 [52] weicht streng genommen von der Definition mit Hilfe der räumlich gemittelten Schallenergiedichte in den Messnormen DIN EN ISO 3382-1/2 [69, 70] und anderer Literatur [120] ab.

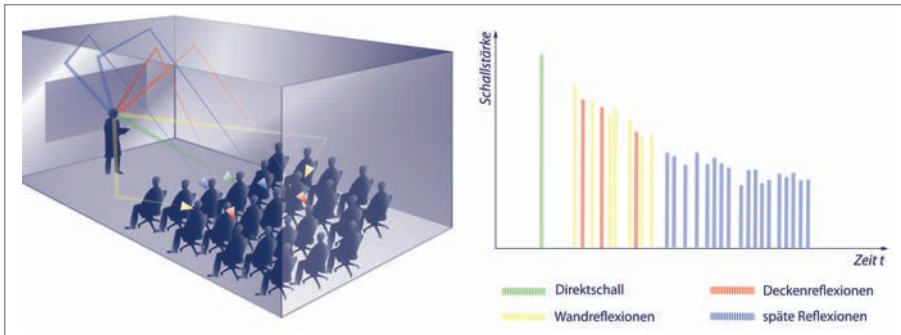


Abbildung 4.2 Pegelabnahme als Summe aller Reflexionen im Raum

dargestellt. Die Idee eines Echogramms besteht darin, dass ein kurzer Schallimpuls ausgesendet wird und den Raum durchläuft. Die einzelnen Schallwege können wie in Abbildung 4.2 angedeutet als geradlinig, ähnlich der Idee eines Lichtstrahls, angenommen werden. In Verbindung mit dem Reflexionsgesetz, entsprechend »Einfallswinkel gleich Ausfallwinkel«, lässt sich die Schallausbreitung im Raum modellhaft nachbilden.

Prinzipiell wird zwischen dem Direktschall und dem Reflexionsschall unterschieden. Für die Wahrnehmung wichtig ist weiterhin noch der Zeitpunkt des eintreffenden Schalls nach dem Direktschall.

Der Direktschall erreicht aufgrund des kürzesten Weges als Erster den Empfänger. Der kürzeste Weg bedeutet zugleich, dass der Direktschall den höchsten Schallpegel besitzt. Sämtliche Reflexionen kommen erst später an und haben aufgrund des längeren Ausbreitungswegs einen geringeren Pegel. Neben der geometrischen Pegelabnahme (Abstandsgesetz nach Gleichung 2.3) kommt es bei jeder Reflexion zu einer weiteren Pegelabnahme durch die Absorption des jeweiligen Materials am Reflexionspunkt.

Prinzipiell wird zwischen frühen und späten Reflexionen bei der Schallausbreitung in einem Raum unterschieden. Die Grenze zwischen früher und später Reflexion ist nicht eindeutig zu definieren, da neben der Art des Schallereignisses auch die Erwartung des Hörers eine Rolle spielt. In der Regel werden Reflexionen innerhalb der ersten 50 ms als förderlich für die Wahrnehmung von Sprache empfunden. Für musikalische Darbietungen werden hingegen Re-

flexionen bis zu 80 ms nach dem Direktschall als positiv aufgefasst. Mit Hilfe der Schallgeschwindigkeit von 340 m/s lässt sich ableiten, dass eine Zeitdauer von 50 ms einem Laufweg von 17 m und 80 ms einem Laufweg von 27 m entspricht. Diese Erkenntnisse sollten bei der geometrischen Gestaltung von Räumen beachtet werden.

In der Regel kann das Ohr die Reflexionen aus dem Raum nicht einzeln auflösen, da das menschliche Ohr eine bestimmte zeitliche Trägheit aufweist, siehe Abschnitt 2.3. Störend empfunden werden Reflexionen, wenn sie sehr stark und/oder zeitlich verzögert auftreten. Starke Einzelreflexionen werden mitunter als Echo wahrgenommen. Starke Mehrfachreflexionen mit periodischen Reflexionsabfolgen werden als Flatterechos bezeichnet.

Aus der Impulsantwort kann mit Hilfe einer energetischen Betrachtung (Integration) die Nachhallzeit bestimmt werden. Die messtechnischen Details hierzu können der einschlägigen Literatur [84, 152] oder auch Normen wie der DIN EN ISO 3382, Teil 2 [70] entnommen werden (Stichwort »Schrödersche Rückwärtsintegration«). Die Impulsantwort kann auf verschiedene Art und Weise gemessen werden. Eine Berechnung der Raumimpulsantwort ist mit Hilfe von dreidimensionalen Raumakustik-Simulationsprogrammen möglich, die vielfach auf der Näherung von Schallstrahlen beruhen.

Die Definition, dass sich die Nachhallzeit auf eine Abnahme des Schallpegels von 60 dB bezieht, erfolgte rein willkürlich. In der Messtechnik sind derartige Pegelabnahmen gerade in größeren Raumvolumina nur mit sehr energiereichen Schallquellen wie beispielsweise Pistolen erreichbar. Aus diesem Grund wird bei Messungen die Nachhallzeit aus einem kleineren Dynamikbereich ermittelt, siehe hierzu auch Abschnitt 4.5. In diesem Zusammenhang wird häufig von T_{20} -Werten gesprochen; dies sind Nachhallwerte, die aus einer Messung mit einem Dynamikbereich von 20 dB ermittelt wurden, sich aber durch Extrapolation auch auf die ursprünglich zur Definition verwendete Pegelabnahme von 60 dB beziehen.

In Abbildung 4.3 ist ein typisches Prüfzeugnis mit dem Ergebnis einer Messung der frequenzabhängigen Nachhallzeit dargestellt. In DIN EN ISO 3382, Teil 2 [70] sind eine Reihe von Angaben aufgeführt, die in einem Prüfbericht enthalten sein müssen. Es hat sich eingebürgert, dass entsprechend verkürzte Ergebnismitteilungen in Form des dargestellten Prüfzeugnisses verwendet werden.

Nachhallzeit nach DIN EN ISO 3382-2 (2008)

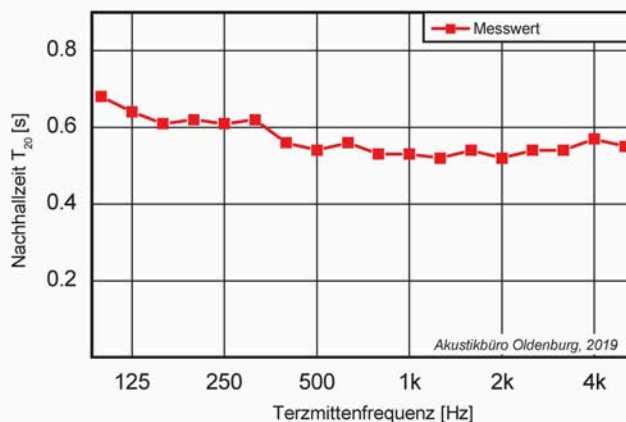
Auftraggeber: Beispielfirma
Straße 1
11111 Beispielstadt



Akustikbüro Oldenburg

Dr. Christian Nocke
Sophienstraße 7, 26121 Oldenburg
www.akustikbuero-oldenburg.de

Gebäude: Beispielgebäude
Raum: Mehrpersonenbüro 001
Raumzustand: unbesetzt, möbliert, wie vorgefunden,
Prüfschall: rosa Rauschen
Empfangsfilter: Terzfilter



Frequenz [Hz]	100	125	160	200	250	315	400	500	630
Nachhallzeit T_{20} [s]	0,68	0,64	0,61	0,62	0,57	0,58	0,56	0,54	0,56

Frequenz [Hz]	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
Nachhallzeit T_{20} [s]	0,53	0,53	0,52	0,54	0,52	0,54	0,54	0,57	0,55

Mittelwert T_{gesamt} (100 Hz – 5000 Hz): 0,57 s
Mittelwert T_{Sprache} (250 Hz – 2000 Hz): 0,54 s

Messdatum: 01.03.2019
Projekt-Nr.: 2019/0001

Bearbeiter: Dipl. Phys. Tiedo Meyer

Tiedo Meyer

Abbildung 4.3 Messung der Nachhallzeit nach DIN EN ISO 3382, Teil 2 [70]; Darstellung der Ergebnisse in Form eines Prüfzeugnisses

Die Nachhallzeit ist eine globale raumakustische Kenngröße, d. h. in einfach strukturierten, quaderförmigen Räumen, wie den meisten Räumen des täglichen Leben, zeigt die Nachhallzeit keine starke Abhängigkeit von der Position von Schallquelle und Empfänger im Raum. Treten starke räumliche Schwankungen der Nachhallzeit im Raum auf, kann dies geradezu als Hinweis auf raumakustisch ungünstige Bedingungen gewertet werden. Flatterechos, Fokussierungen oder aber die Wirkung von abgetrennten oder angekoppelten Räumen und Raumteilen zeigen sich dann auch in der Nachhallzeit. Auch die Analyse einzelner Nachhallvorgänge kann hilfreiche Hinweise geben.

Die Nachhallzeit ist eine frequenzabhängige raumakustische Kenngröße. Messungen werden in der Regel in Terz- oder Oktavbandbreite durchgeführt. Die Anregung erfolgt hierbei mit breitbandigen Rauschsignalen, sodass Messungen bei kleinen bis mittelgroßen Räumen heutzutage keinen großen Aufwand bedeuten. Bei raumakustischen Planungen erfolgt die Berechnung meist in Oktavbandbreite. Auch dies ist bei den betrachteten sechs Oktaven ein überschaubarer Rechenaufwand.

Durch die raumakustische Kenngröße der Nachhallzeit werden unterschiedlichste Räume miteinander vergleichbar und können in ihrer raumakustischen Qualität bewertet werden. Zur Bewertung der Nachhallzeit wird auch deren Frequenzverlauf herangezogen. Als Nachhallkurve wird im Folgenden die frequenzabhängige Nachhallzeit bezeichnet.

Die Nachhallzeit kann nach verschiedenen Ansätzen berechnet werden. Je nach Fragestellung sind überschlägige oder aber detailliertere Verfahren und Modellbildungen notwendig. Hierauf wird in Kapitel 6 eingegangen. Die verschiedenen Berechnungsansätze und zugehörigen Anwendungsbereiche werden dort kurz erläutert. Verfahren zur Messung der Nachhallzeit werden im Abschnitt 4.5 vorgestellt.

Die Nachhallzeit und die Sprachverständlichkeit in einem Raum hängen voneinander ab, auch wenn sie streng genommen unabhängige raumakustische Kenngrößen sind. Allgemein gilt, dass mit zunehmender Nachhallzeit die im Raum gemittelte Sprachverständlichkeit abnimmt. Dies bedeutet nicht, dass die kürzeste Nachhallzeit generell die beste Nachhallzeit ist. Eine ungenügende Sprachverständlichkeit deutet in der Regel auf eine zu lange Nachhallzeit hin. Die Sprachverständlichkeit als nicht-statistische Kenngröße wird im folgenden Abschnitt vorgestellt.

4.3 Sprachverständlichkeit

Die vielleicht klassischste Methode zur Messung der Sprachverständlichkeit in Räumen ist die systematische Befragung einer ausreichend großen Anzahl von Personen mit genormten Listen von Silben und Sätzen [126]. Dieses Vorgehen ist jedoch mit großem Aufwand verbunden und wird daher meist nur im Zusammenhang mit Forschungsfragen oder aber sehr prestigeträchtigen Räumen, wie Parlamenten oder Konzertsälen, durchgeführt.

Auf der Grundlage derartiger subjektiver Untersuchungen wurden physikalische Messgrößen zur Beschreibung der Sprachverständlichkeit entwickelt. Eine weit verbreitete Größe ist der Sprachübertragungsindex (engl. »Speech Transmission Index«, kurz STI). Eine weitere klassische Kenngröße zur Bewertung der Sprachqualität ist die Deutlichkeit D_{50} . Die Bedeutung von D_{50} nimmt aufgrund der stärkeren Verbreitung des STI-Werts ab.

Sprachübertragungsindex STI

Mit der DIN EN 60268-16 [62] wurde ein ausführliches Regelwerk geschaffen, in dem das objektive Verfahren zur Bewertung der Sprachverständlichkeit in vielerlei Hinsicht dargestellt ist. Im Rahmen dieses Buches sind insbesondere die Aspekte der Sprachverständlichkeit ohne Beschallungsanlage in Räumen erwähnenswert. Gegenüber den Vorgängerfassungen der DIN EN 60268-16 wurden in der letzten Fassung eine Reihe von Fortschreibungen, Klarstellungen und Ergänzungen aufgenommen.

Der Sprachübertragungsindex STI wurde in den 1970er Jahren entwickelt und hat seitdem eine Reihe von Modifikationen erfahren. Grundlage der Bestimmung des STI ist eine Erfassung der Übertragung zwischen einer Schallquelle (Sprecher) und einem Empfangspunkt (Hörer). Je stärker die Übertragung durch den Einfluss des Raums (Nachhall, Abschirmung, Echos) oder die akustische Umgebung (Hintergrundpegel, weitere Schallquellen) gestört wird, desto schlechter ist die Sprachverständlichkeit bzw. desto kleiner ist der STI-Wert. Dieser Zusammenhang ist direkt zu beobachten, wenn bei ungünstigen raumakustischen Bedingungen die damit einhergehende schlechte Sprachverständlichkeit durch ein Anheben der Sprechlautstärke (Pegelerhöhung) kompensiert wird. Andererseits kann bei bestehender, aber unerwünschter sehr guter

Sprachverständlichkeit durch künstliches Einspielen von Geräuschen (in der Regel Rauschsignale) die Sprachverständlichkeit gesenkt werden. Dieser Effekt wird technisch durch sogenannte »Sound masking«-Systeme umgesetzt.

Der STI-Wert berücksichtigt sowohl den Einfluss des Nachhalls als auch den Schallpegel von Störgeräuschen. Die Tabelle 4.2 zeigt die klassische Zuordnung zwischen dem STI-Wert und der zugehörigen Einstufung der Sprachverständlichkeit nach DIN EN ISO 9921[78]. Es ist darauf hinzuweisen, dass zwischen STI-Wert und der subjektiven Sprachverständlichkeit zwar ein Zusammenhang besteht, dass aber genau zwischen Satzverständlichkeit, Wortverständlichkeit und Silbenverständlichkeit zu unterscheiden ist. Schon ab einem STI von mehr als 0,45 werden einfache Sätze zu 100% verstanden.

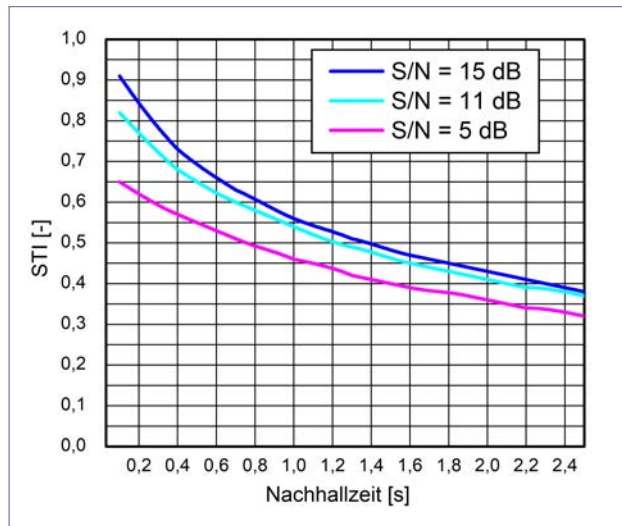
Wertebereich STI	Sprachverständlichkeit
0,75 bis 1,00	sehr gut
0,60 bis 0,75	gut
0,45 bis 0,60	befriedigend
0,30 bis 0,45	schlecht
0,00 bis 0,30	sehr schlecht

Tabelle 4.2 Zuordnung zwischen der Sprachverständlichkeit und dem STI-Wert, Auszug aus Tabelle F.1, DIN EN ISO 9921 [78]

Eine hundertprozentige Satzverständlichkeit bedeutet nicht, dass jedes einzelne Wort klar verstanden wird. Auch die Hörsituation muss zum Verstehen von Sätzen nicht entspannt und angenehm sein. In ungünstigen Umgebungen, z. B. mit hohem Störgeräusch oder langem Nachhall, oder auch in Warnsituationen, ist es ausreichend, dass eine kurze Mitteilung vollständig verstanden wird, selbst wenn das korrekte Verstehen einen hohen Stimmaufwand oder auch eine besondere Höranstrengung darstellt [78]. In Besprechungsräumen, Hörsälen oder auch an Arbeitsplätzen, an denen Sprachkommunikation ein Teil der Aufgabe bzw. Tätigkeit ist, sind geringe Sprech- und Höranstrengung wünschenswert. Dies erfordert für den Sprecher einen geringen Stimmaufwand. Für den Hörer sind in erster Linie die Verständlichkeit und die Qualität der Sprache von Bedeutung. Im Vergleich zu anderen Kenngrößen zur Sprachverständlichkeit berücksichtigt der STI neben dem Einfluss des Hintergrundgeräusches und des Sprachpegels auch die Übertragung im Raum bzw. durch das Übertragungssystem. Nachhall und Echos können als Verzerrung des ausgesendeten Sprachsignals interpretiert werden. Das Verstehen von Sprache ist in verschiedenen Alltagssituationen von entscheidender Bedeutung. Somit ist es naheliegend, die Bewertung von Sprache durch den STI-Wert vorzunehmen, siehe Probst/Böhm [163].

Der Zusammenhang von Nachhallzeit und STI kann allgemein rechnerisch in Abhängigkeit vom Hintergrundgeräusch bestimmt werden. Die entscheidende Größe ist hierbei nicht der absolute Schallpegel des Hintergrundgeräusches selbst, sondern das sogenannte S/N-Verhältnis (engl.: »Signal-to-Noise Ratio«), das den Unterschied zwischen dem Sprachsignal und dem Störgeräusch angibt. In Abbildung 4.4 ist für verschiedene S/N-Werte der STI-Wert in Abhängigkeit von der Nachhallzeit dargestellt.

Abbildung 4.4 Abhängigkeit des STI-Wertes von der Nachhallzeit für verschiedene S/N-Verhältnisse



Ein Wert von 15 dB für S/N bedeutet, dass der Sprachpegel ohne Störgeräuscheinfluss wahrgenommen wird. Um einen STI-Wert von mehr als 0,5 (bei 15 dB für S/N) zu erreichen, sollte die Nachhallzeit nicht länger als 1,4 s sein. Hierbei wird davon ausgegangen, dass ein diffuses Schallfeld vorhanden ist und der Sprachpegel beim Hörer nicht niedriger als 40 dB und nicht höher als 80 dB ist. Dies ist in der Regel der Fall (siehe auch Abschnitt 6.5). Unterhalb von 40 dB schränkt die Hörschwelle (siehe Abbildung 2.8) die Sprachverständlichkeit ein. Liegt der Sprachpegel oberhalb von 80 dB kommt es zu Maskierungseffekten. Aus Abbildung 4.4 kann auch abgelesen werden, dass bei Werten der Nachhallzeit von weniger als 1 s eine Verbesserung des S/N-Werts um 10 dB zu einer Zunahme des STI von mehr als 0,1 führt. Die Wahrnehmbarkeitsschwelle (engl.: »Just noticeable Difference«, kurz JND) des STI liegt bei einem Wert von 0,03 [175].

Kategorie	STI-Nennwert	Art der Nachrichteninformation	Beispiel	Bemerkung
A+	> 0,76		Aufnahmestudios	sehr gute Verständlichkeit, aber in den meisten Umgebungen selten erreichbar
A	0,74	komplexe Nachrichten, unbekannte Wörter	Theater, Vortragssäle, Plenarsäle, Gerichtssäle, Hörhilfesysteme	hohe Sprachverständlichkeit
B	0,70	komplexe Nachrichten, unbekannte Wörter	Theater, Vortragssäle, Plenarsäle, Gerichtssäle, Hörhilfesysteme	hohe Sprachverständlichkeit
C	0,66	komplexe Nachrichten, unbekannte Wörter	Theater, Vortragssäle, Telefonkonferenzen, Plenarsäle, Gerichtssäle	
D	0,62	komplexe Nachrichten, bekannte Wörter	Hörsäle, Klassenräume, Konzertsäle	gute Sprachverständlichkeit
E	0,58	komplexe Nachrichten, bekannter Kontext	Konzertsäle, moderne Kirchen	Beschallungsanlagen hoher Qualität
F	0,54	komplexe Nachrichten, bekannter Kontext	Beschallungsanlagen in Einkaufszentren, öffentlichen Bürogebäuden, Sprachalarmierungsanlagen, Kathedralen	Beschallungsanlagen guter Qualität
G	0,50	komplexe Nachrichten, bekannter Kontext	Einkaufszentren, öffentlichen Bürogebäuden, Sprachalarmierungsanlagen	Zielanforderung für Sprachalarmanlagen
H	0,46	einfache Nachrichten, bekannte Wörter	Sprachalarm- und Beschallungsanlagen in schwierigen akustischen Umgebungen	Mindestanforderung für Sprachalarmanlagen
I	0,42	einfache Nachrichten, bekannter Kontext	Sprachalarm- und Beschallungsanlagen in sehr schwierigen Räumen	
J	0,38		nicht für Beschallungsanlagen geeignet	
U	< 0,36		nicht für Beschallungsanlagen geeignet	

Tabelle 4.3 Qualifikationsbänder und zugehörige typische Anwendungen für den STI nach Anhang F und G in DIN EN 60286-16 [62]

Eine genauere Unterteilung mit 12 Stufen, sogenannte Qualifikationsbänder, als in DIN EN ISO 9921 [78] ist in den Anhängen F und G der DIN EN 60268-16 [62] aufgeführt, wobei dort verschiedene Anwendungsbeispiele von Aufnahmestudios über Theater, Gerichtsräume, Konzertsäle bis hin zu Einkaufszentren angeführt werden. Diese Anwendungsbeispiele beziehen sich wiederum auf elektroakustische Anlagen.

Informativ sind ebenfalls die Anhänge H und I der DIN EN 60268-16 mit Angaben für STI-Werte sowohl für fremdsprachliche Hörer als auch für Hörer mit Hörverlusten im Alter von mehr als 60 Jahren. Nach diesen Hinweisen benötigt ein erfahrener fremdsprachlicher Hörer, der täglich in der fremden Sprache kommuniziert, für eine sehr gute Sprachverständlichkeit einen minimalen Wert von 0,86 statt 0,75. Die gegenüber der Tabelle 4.2 verschobenen Skalen sind in den Anhängen zur DIN EN 60268-16 [62] zu finden. Inwieweit diese indikativen Hinweise zutreffend sind, wird in aktuellen Forschungsprojekten vertieft.

In der aktuellen Fassung der DIN EN 60268-16 [62] werden neben der Übertragung des Schalls in einem Raum als Anwendung, also ohne elektroakustisches System im Übertragungsweg, auch Anpassungen der STI-Methode für Übertragungen mit elektroakustischen Systemen beschrieben. Klassischerweise sind damit Beschallungsanlagen zur Durchsage und Alarmierung hinsichtlich der Sprachverständlichkeit zu untersuchen. Weiterhin werden in der Norm auch Hörsysteme und Kommunikationssysteme angeführt. Die Kenngrößen STIPA (»STI for Public Address systems«) für Beschallungsanlagen sowie STITEL (»STI for TELEcommunication systems«) für Telekommunikationsanlagen sind im Hinblick auf die raumakustischen Anwendungen dieses Buchs nicht von Interesse.

Der STI-Wert ist eine nicht-statistische bzw. lokale raumakustische Kenngröße. Nach Hinweis in der DIN EN 60268-16 [62], Anhang F sollte bei Messungen in einem bestimmten Raumbereich eine räumlich-statistische Analyse der STI-Werte durchgeführt werden. Auf diese Weise können dann Aussagen zum durchschnittlichen STI-Wert und seiner Schwankung oder auch zur Standardabweichung in einem Raum getroffen werden. Anders als die Nachhallzeit ist der STI-Wert eine Einzahlangabe; die Frequenzabhängigkeit wird in dem Kennwert mit erfasst.

Sprach-Störschall-Pegel SIL

Eine weitere Kenngröße für die Sprachverständlichkeit ist der Sprach-Störschall-Pegel SIL (engl.: »Speech Interference Level«). Dieser Kennwert wird in DIN EN ISO 9921 [78] beschrieben. Der SIL ermöglicht eine Beurteilung der Sprachverständlichkeit bei direkter Kommunikation in einer lärmerfüllten Umgebung und basiert auf der Differenz zwischen dem Sprachpegel und dem Sprach-Störschall-Pegel L_{SIL} am Ort des Hörers. Der Sprach-Störschall-Pegel wird als arithmetischer Mittelwert der Schalldruckpegel in den vier Oktavbändern zwischen 500 Hz und 4 000 Hz ermittelt. Da er sich auf Langzeitmittelwerte von Sprach- und Störpegel bezieht, ist er in Umgebungen wie Büros eher nicht zielführend.

Deutlichkeit D_{50} und Klarheitsmaß C_{80}

Anders als der STI-Wert berücksichtigt die klassische Kenngröße Deutlichkeit nicht den Einfluss des Störpegels im Raum, sondern beruht auf einer Analyse der Impulsantwort in einem Raum, siehe DIN EN ISO 3382, Teil 2 [70]. Damit ist auch die Deutlichkeit eine lokale raumakustische Kenngröße, die wiederum von der Frequenz abhängt. Die Deutlichkeit beruht auf dem Verhältnis von zwei Energieanteilen in der Impulsantwort. Bei der Betrachtung von Sprache wird die Energie der ersten 50 ms ins Verhältnis zur Gesamtschallenergie der Impulsantwort gesetzt. Entsprechend wird die Kenngröße Deutlichkeit mit D_{50} abgekürzt. Die Zeitdauer von 50 ms wird bei der Betrachtung von Sprache verwendet; bei Musik wird in der Regel eine Zeitdauer von 80 ms verwendet und die entsprechende Kenngröße als Klarheitsmaß C_{80} bezeichnet. Die Definitionen der Kenngrößen wie auch das Vorgehen zur Messung sind im Anhang A der DIN EN ISO 3382, Teil 1 [69] aufgeführt.

Sowohl das Klarheitsmaß C_{80} als auch die Deutlichkeit D_{50} beschreiben die Balance zwischen früh und spät eintreffender Schallenergie. Beide Kenngrößen sind von der Nachhallzeit unabhängige Kenngrößen. Es ist durchaus vorstellbar und auch messbar, dass bei identischer Energie- bzw. Pegelabnahme (Nachhallzeit) durch die Raumform sowie die Absorber- und Reflektoranordnung gänzlich andere Energieverhältnisse auf den Empfangspunkten im Raum ausgelöst werden. Dies zeigt, dass bei gleicher Nachhallzeit und bei gleichem

Raumvolumen allein durch die Innenraumgestaltung und Raumform verschiedene Hörbedingungen, ausgedrückt durch die Kenngrößen D_{50} und C_{80} , geschaffen werden können.

4.4 Weitere Kenngrößen

Die Impulsantwort zwischen einer Schallquelle und einem Empfangspunkt in einem Raum enthält als Summe aller Reflexionen sämtliche Informationen über die Schallausbreitung. Eine weitergehende Analyse der Raum-Impulsantwort liefert die zuvor beschriebenen Kenngrößen wie die frequenzabhängige Nachhallzeit, den STI-Wert und die frequenzabhängige Deutlichkeit.

Gerade im Bereich der Musik hat es zahlreiche Entwicklungen weiterer objektiver Kenngrößen zur Beschreibung der Qualität von Räumen gegeben. Diese Größen im Detail anzuführen würde den Rahmen dieses Buches sprengen und wäre für die betrachteten Räume des Alltags nicht von großem Interesse. In der einschlägigen Literatur zur Planung von Konzertsälen und Opernhäusern werden eine Reihe weiterer Parameter beschrieben, siehe Fasold/Veres [84], Beranek [16, 17] oder Barron [14], die allerdings nicht normativ beschrieben sind. Kriterien wie das Bassverhältnis BR, das Hallmaß H oder das Raumeindrucksmaß R können teilweise aus anderen Kenngrößen abgeleitet werden und sind in der Regel speziell für Anwendungen bei Räumen mit hochwertiger Musikwiedergabe konzipiert worden.

Mit der Einführung der DIN EN ISO 3382, Teil 1 [69] wurden im Jahr 2009 die vermeintlich wichtigsten Kenngrößen für Aufführungsräume normativ beschrieben. Eine eventuell ebenso komplexe Aufgabe wie die Gestaltung eines Konzertsaals oder Opernhauses ist die Planung eines funktionierenden Großraumbüros. Für diesen Anwendungsfall, in dem es auf möglichst geringe Sprachverständlichkeit sowie auf niedrige Schallpegel ankommt, wurde im Jahr 2012 die DIN EN ISO 3382, Teil 3 [71] mit eigenen raumakustischen Kenngrößen für Großraumbüros eingeführt.

Im Folgenden werden die Kenngrößen der Teile 1 und 3 der DIN EN ISO 3382-Serie angeführt. Dies dient in erster Linie der Vollständigkeit, auch wenn in den gewöhnlichen Räumen des Alltags hauptsächlich die Nachhallzeit als

Kenngröße ausreicht, so wie dies durch den Titel des Teils 2 der DIN EN ISO 3382 »Messung von Parametern der Raumakustik - Teil 2: Nachhallzeit in gewöhnlichen Räumen« schon zum Ausdruck gebracht wird.

In Tabelle 4.4 sind die raumakustischen Parameter der drei Teile der DIN EN ISO 3382-Serie zusammenfassend aufgeführt. Anhand der Übersicht wird deutlich, dass eine Vielzahl von raumakustischen Kenngrößen speziell für Aufführungsräume existiert. Hier hat sich unter Akustikern eine lebhafte Diskussion um die Anwendung der Kenngrößen des Teils 1 der DIN EN ISO 3382 entwickelt. Normative Vorgaben oder andere Empfehlungen für Aufführungsräume wie Konzertsäle, Opernhäuser oder andere Räumlichkeiten existieren nicht, sondern sind nach den jeweiligen Erfordernissen eines Raums festzulegen.

DIN EN ISO 3382 ...	raumakustische Parameter
Teil 1 Aufführungsräume	T_{20} Nachhallzeit T_{30} Nachhallzeit G Stärkemaß * EDT Frühe Abklingzeit * C_{80} Klarheitsmaß * D_{50} Deutlichkeit * T_S Schwerpunktzeit * J_{LF} Früher seitlicher Energieanteil * L_J Später seitlicher Energieanteil *
Teil 2 gewöhnliche Räume	T_{20} Nachhallzeit T_{30} Nachhallzeit
Teil 3 Großraumbüros	STI (Messung nach vollständigem Verfahren DIN EN 60268-16[62]) r_D Ablenkungsabstand r_P Vertraulichkeitsabstand $D_{2,S}$ Räumliche Abklingrate $L_{p,A,S,4\text{ m}}$ Sprachpegel in 4 m-Entfernung $L_{p,A,B}$ Fremdgeräusch
* abgeleitete Kenngrößen bzw. Gütemaße nach Anhang A (informativ) in [69]	

Tabelle 4.4 Übersicht der raumakustischen Parameter aus DIN EN ISO 3382, Teile 1 bis 3 [69, 70, 71]

Teil 2 der DIN EN ISO 3382 kann als der wichtigste Teil für die gewöhnlichen Räume angesehen werden, da in der Regel die Nachhallzeit als Kriterium für die raumakustische Qualität verwendet wird. Teil 3 betrachtet den speziellen Fall der Großraumbüros, in denen neben der Nachhallzeit weitere Kenngrößen eine Rolle spielen. Für die Nachhallzeit in gewöhnlichen Räumen wie auch die weiteren Parameter des Teils 3 der DIN EN ISO 3382 existieren mit den unter Ziffer 5 angeführten Regelwerken inzwischen Empfehlungen und Vorgaben.

Kenngrößen nach DIN EN ISO 3382 – Teil 1

Im Teil 1 der DIN EN ISO 3382 werden die in Tabelle ?? aufgeführten Kenngrößen definiert. Diese Kenngrößen können aus der Impulsantwort abgeleitet werden. Es handelt sich durchweg um nicht-statistische, frequenzabhängige Kenngrößen eines Raums. Neben dem in der Tabelle angegebenen Frequenzbereich zur Bildung eines Mittelwerts sind in der Norm auch Vorschläge zur Erfassung und Darstellung der räumlichen Schwankung in einem Raum genannt. Diese Hinweise, wie auch die teilweise recht umfangreichen mathematischen Definitionen, werden hier nicht wiederholt, da diese nur in wenigen Fällen relevant für die in diesem Buch behandelten Raumtypen sind. Anhand der Darstellung in der Norm wird klar, dass bei einigen der Kenngrößen durchaus noch Unklarheit über die Wahrnehmbarkeit von Änderungen der jeweiligen Größe und somit offenbar noch Forschungsbedarf besteht.

Die subjektive Wahrnehmung des räumlichen Phänomens Schall wird durch diese weitestgehend monauralen Kenngrößen nur ansatzweise abgebildet. Der Anhang B der Norm führt entsprechend auch binaurale Messgrößen in Zuhörerräumen an, weist aber zugleich darauf hin, dass zumindest im Sinne der Normung noch keine allgemeine Übereinstimmung hinsichtlich der binauralen als auch der anderen räumlichen Kenngrößen besteht. Gerade die aktuellen Entwicklungen im Bereich der Messtechnik, wie 3D-Mikrophon-Arrays, lassen hier spannende Entwicklungen erwarten.

Subjektiver Zuhörerspekt	Akustische Größe	Einzelfrequenz- Mittelwertbildung	Unterscheidungs- schwelle (JND)	Üblicher Bereich
Messgrößen (Gütemaße) für Zuhörerraum				
subjektiver Schallpegel	Stärkemaß G in dB	500 bis 1 000 Hz	1 dB	−2 dB bis 10 dB
wahrgenommene Halligkeit	frühe Abklingzeit (EDT) in s	500 bis 1 000 Hz	rel. 1%	1 s bis 3 s
wahrgenommene Transparenz	Klarheitsmaß C_{80} in dB Deutlichkeit D_{50} Schwerpunktzeit T_s in ms	500 bis 1 000 Hz 500 bis 1 000 Hz 500 bis 1 000 Hz	1 dB 0,05 10 ms	−5 dB bis 5 dB 0,3 bis 0,7 60 ms bis 260 ms
scheinbare Quellenbreite (ASW)	früher seitlicher Energieanteil, J_{LF} oder J_{LFC} in s	125 bis 1 000 Hz	0,05	0,05 bis 0,35
Zuhörer-Einhüllung (LEV)	später seitlicher Schallpegel L_I in dB	125 bis 1 000 Hz	unbekannt	−14 dB bis 1 dB
Bühnennmessgrößen				
Ensemblebildung	frühe Unterstützung ST_{early} in dB	250 bis 2 000 Hz	unbekannt	−24 dB bis −8 dB
wahrgenommene Halligkeit	späte Unterstützung ST_{late} in dB	250 bis 2 000 Hz	unbekannt	−24 dB bis −10 dB

Tabelle 4.5 Übersicht zu den aus Impulsantworten abgeleiteten Größen der DIN EN ISO 3382, Teil 1 [69], Zusammenfassung aus Anhängen A und C

Kenngrößen nach DIN EN ISO 3382 – Teil 3

Mit der Verabschiedung der DIN EN ISO 3382-3 [71] im Mai 2012 wurden Kenngrößen und Verfahren zur objektiven Messung im Großraumbüro eingeführt. Neben der Nachhallzeit stehen folgende eindeutig definierte Größen bzw. Einzahlwerte zur Verfügung:

- räumliche Abklingrate des A-bewerteten Schalldruckpegels der Sprache, kurz $D_{2,S}$
- Ablenkungsabstand, kurz r_D , und Vertraulichkeitsabstand, kurz r_P
- bewerteter Schalldruckpegel der Sprache in einem Abstand von 4 m, kurz $L_{p,A,S,4m}$

Anhand dieser Kenngrößen lassen sich die akustischen Bedingungen in einem Großraumbüro objektiv bewerten und vergleichen. Die räumliche Abklingrate $D_{2,S}$ wie auch der Sprachpegel in 4 m Abstand $L_{p,A,S,4m}$ beziehen sich auf ein normiertes Spektrum von Sprache. Dieses normierte Sprachspektrum in 1 m Abstand von der ungerichteten Quelle ist in Abbildung 4.5 dargestellt.

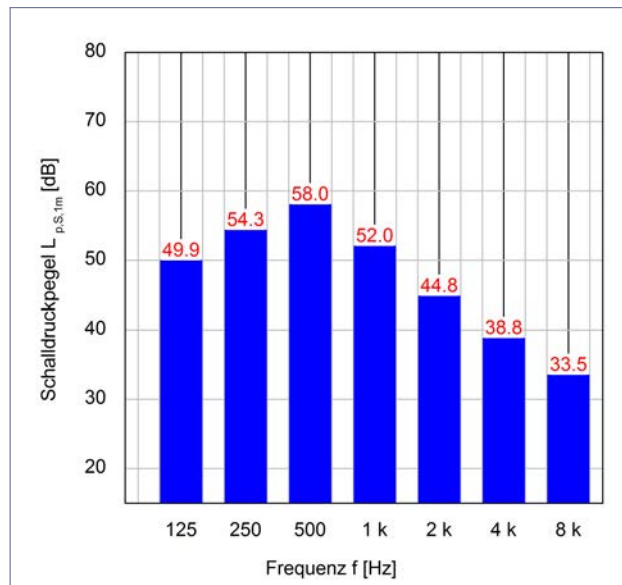


Abbildung 4.5 Definition des normierten Sprachpegels nach DIN EN ISO 3382-3 [71]

Es ergibt sich ein frequenzgemittelter Summenpegel von 57,4 dB in 1 m Abstand von der Schallquelle. Nach Angabe in der Norm handelt sich um einen Mittelwert aus männlichen und weiblichen Stimmen bei normaler Sprechanstrengung. Außerdem wird von einer ungerichteten Schallabstrahlung ausgegangen. Reale Sprecher haben durchaus andere Spektren. Somit stellt das Spektrum in Abbildung 4.5 nur eine künstliche Bezugsgröße zur Messung dar. Durch die Festlegung eines normierten Sprachspektrums werden die Messungen in verschiedenen Räumen miteinander vergleichbar. Die Kenngrößen des Teils 3 der DIN EN ISO 3382 werden auf dieses Spektrum bezogen.

Der Ablenkungsabstand r_D beschreibt den Abstand zur Quelle, an dem der STI-Wert auf 0,50 gesunken ist. Der Abstand zur Quelle, an dem der STI-Wert bei 0,20 liegt, wird als Vertraulichkeitsabstand r_P bezeichnet. Die Ableitung dieser Einzahlwerte erfolgt auf Grundlage von Messungen des Schallpegels, des Sprachübertragungsindex STI [62] sowie des Fremdgeräuschpegels entlang zuvor definierter Messwege zwischen Arbeitsplätzen im Großraumbüro. In der DIN EN ISO 3382, Teil 3 [71] wird definiert, wie die Messwege zu wählen sind. Die Messungen sind entlang einer Linie, die nicht gerade sein muss, durchzuführen. Die erste Messposition muss am zur Schallquelle nächstgelegenen Arbeitsplatz liegen. Es sind mindestens vier, idealerweise sechs bis zehn Positionen auf dem Messweg in einem Bereich zwischen 2 m bis 16 m Abstand zur Quelle zu untersuchen.

Die Messungen sind ohne Personen im betriebsfertigen Raum durchzuführen; es wird darauf hingewiesen, dass sich durch Geräusche der Menschen im Raum positive Maskierungseffekte ergeben können. Im Raum vorhandene künstliche Maskierungssysteme sind bei der Messung einzuschalten.

Aus der Abnahme des Schallpegels entlang des Messweges wird unter Berücksichtigung des normierten Sprachspektrums der Einzahlwert $D_{2,S}$ durch lineare Regression ermittelt. Das gleiche Vorgehen wird zur Bestimmung des Ablenkungsabstandes r_D und des Vertraulichkeitsabstandes r_P für die Messgröße STI durchgeführt. In Abbildung 4.6 ist exemplarisch ein Ergebnisblatt mit den Messungen der Abnahme des Schalldruckpegels sowie des STI im Raum dargestellt. Aus den Kurven zur räumlichen Abnahme der Messwerte (Schallpegel und Sprachverständlichkeit) im Raum werden rechnerisch die Einzahlwerte bestimmt.

Bei der DIN EN ISO 3382-3 [71] handelt es sich um eine reine Messvorschrift. Eine Bewertungsgrundlage wurde, anders als im Entwurf zur Norm aus dem Jahr 2009, in der final verabschiedeten Fassung im Jahr 2012 nicht aufgeführt.

4.5 Messung der raumakustischen Parameter

In diesem Abschnitt werden kurz die wichtigsten Hinweise und Anmerkungen zur Durchführung raumakustischer Messungen zusammengefasst.

Während es bis zur Einführung der DIN EN ISO 3382-1 [69] im Jahr 2009 lediglich eine Norm zur Messung raumakustischer Parameter gab, existieren inzwischen drei Teile der DIN EN ISO 3382. Teil 2, eingeführt im September 2008, bezieht sich auf die Messung der Nachhallzeit in gewöhnlichen Räumen, Teil 1, erschienen im Oktober 2009, behandelt die Messung in Aufführungsräumen und der im Mai 2012 final publizierte Teil 3 behandelt die Messung in Großraumbüros.

Die Messung der raumakustischen Parameter der Teile 2 und 3 der DIN EN ISO 3382 wird im Folgenden kurz zusammengefasst.

Raumakustische Messungen sind in der Praxis häufig sinnvoll und hilfreich, wenn subjektiv Beschwerden über die Situation in einem Raum geäußert werden. Zum einen dienen die Messergebnisse der Objektivierung und können weiterhin die Grundlage einer raumakustischen Planung bilden. Es ist anzumerken, dass durch die Objektivierung häufig auch die subjektiv geäußerten Bedenken genauer eingegrenzt und durch einen Vergleich mit einschlägigen Anforderungen und Empfehlungen in Einzelfällen sogar gänzlich aufgelöst werden können.

Teil 2 der DIN EN ISO 3382 [70] behandelt die Messung der Nachhallzeit in verschiedenen Räumen des Alltags. Als Raumtypen werden Wohnräume, Treppenhäuser, Werkstätten, Industrieanlagen, Klassenräume, Büros, Restaurants, Messehallen, Sporthallen sowie Bahnhöfe und Flughafenabfertigungsgebäude explizit benannt.

Messung von Parametern der Raumakustik nach DIN EN ISO 3382-3 (2012)

Auftraggeber: Beispielfirma
Straße 1
11111 Beispielstadt

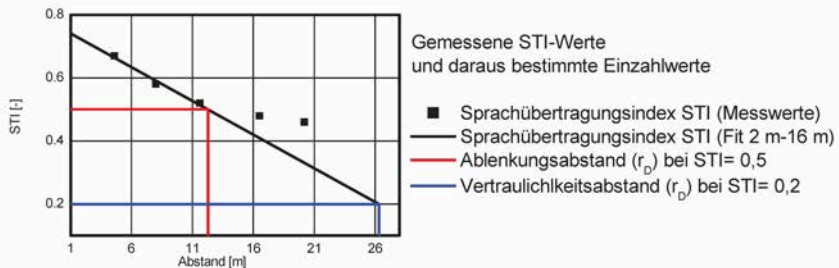
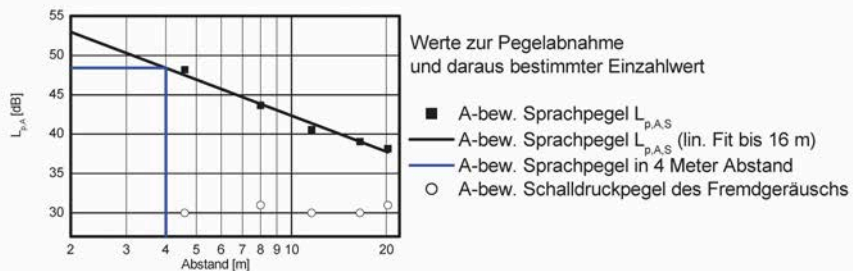


Akustikbüro Oldenburg

Dr. Christian Nocke
Sophienstraße 7
26121 Oldenburg
www.akustikbuero-oldenburg.de

Gebäude: Beispielgebäude
Raum: Mehrpersonenbüro 001
Messpfad: 1, siehe Skizze in Anhang A
Raumzustand: unbesetzt, möbliert, wie vorgefunden

Einzelheiten zu Raumsituation und Messdurchführung sind dem Messbericht zu entnehmen


Einzahl-Werte nach DIN EN ISO 3382-3:

STI am nächstgelegenen Arbeitsplatz [-]	0,67
Ablenkungsabstand r_D [m]	12
Vertraulichkeitsabstand r_p [m]	20
Räumliche Abklingrate des A-bewerteten SPL der Sprache, $D_{2,s}$ [dB]	5
A-bewerteter SPL der Sprache im 4 m Abstand, $L_{p,A,S,4m}$ [dB]	48
Mittleres A- bewertetes Fremdgeräusch, $L_{p,A,B}$ [dB]	30

Messdatum: 01.03.2019
Projekt-Nr.: 2019/0007

Bearbeiter:

Timo Meyer

Abbildung 4.6 Kennwerte nach DIN EN ISO 3382, Teil 3 [71]; Darstellung der Ergebnisse in Form eines Prüfzeugnisses

Für die technischen Details der Messung wird im Teil 2 der DIN EN ISO 3382 auf den Teil 1 der Messnorm verwiesen. Hierauf kann im Rahmen des Buches nur kurz eingegangen werden, es ist der Normtext des Teils 1 der DIN EN ISO 3382 [69] heranzuziehen. Es ist eine Schallquelle mit ungerichteter Abstrahlung (Kugelschallquelle) im Frequenzbereich zwischen 125 Hz und 4 000 Hz zu verwenden. Die höchstzulässige Abweichung von der kugelförmigen Abstrahlung liegt bei ± 1 dB unterhalb von 500 Hz, ± 3 dB bei 1 000 Hz, ± 5 dB bei bis zu 2 000 Hz und ± 6 dB bei 4 000 Hz. Weiterhin muss die Schallquelle einen ausreichend hohen Schallpegel erzeugen. Das Mikrofon sollte ungerichtet (Kugelcharakteristik) und so klein wie möglich sein. Weiterhin bestehen Anforderungen an die im Gerät verwendeten Filter als auch an die Aufzeichnungs- bzw. Aufnahmegeräte an sich. Die Details zu den apparativen Anforderungen sind unter Ziffer 4 des Teils 1 der DIN EN ISO 3382 zu finden.



Abbildung 4.7 Normgerechter Lautsprecher (Dodekaeder) nach DIN EN ISO 3382-1 [69]
[Quelle: Norsonic-Tippkemper GmbH]

Sowohl im Teil 1 als auch im Teil 2 der DIN EN ISO 3382 werden zwei mögliche Verfahren zur Messung der Nachhallzeit angeführt: das Verfahren des abgeschalteten Rauschens sowie das Verfahren der integrierten Impulsantwort. Die Unterschiede sowie jeweiligen Vor- und Nachteile dieser beiden Verfahren können an dieser Stelle nicht vertieft werden, sondern es ist sowohl auf die beiden Normenteile als auch auf die weitergehende Fachliteratur zur akustischen Messtechnik wie [89, 152] zu verweisen. Prinzipiell wird

zwischen einem Kurzverfahren, einem Standardverfahren und einem Präzisionsverfahren unterschieden. Für das Kurzverfahren genügt es, die Messungen in den Oktavbändern zwischen 250 Hz und 2 000 Hz mit einer Senderposition zur Anregung des Schallfeldes durchzuführen. Das Kurzverfahren dient lediglich zur Beurteilung der Absorption im Raum für Schallschutzzwecke. Zur Überprüfung der Anforderungen an die Nachhallzeit eines Raums ist das Standardverfahren anzuwenden. Hierbei sind mindestens zwei Senderpositionen im Raum sowie sechs unabhängige Sender-Mikrofon-Kombinationen erforderlich. Für das Präzisionsverfahren sind ebenfalls zwei Senderpositionen, dann allerdings zwölf Sender-Mikrofon-Kombinationen, zu verwenden. Die Messungen sind beim Standard- und Präzisionsverfahren in den sechs Oktaven zwischen 125 Hz und 4 000 Hz oder den 18 Terzen zwischen 100 Hz und 5 000 Hz durchzuführen.

Für das Präzisionsverfahren wird bei Messungen der Nachhallzeit in Terzbandbreite eine Genauigkeit von weniger als 5% und in Oktavbandbreite von weniger als 2,5% angegeben. Für das Standardverfahren liegt die Genauigkeit bei 10% bei Terzmessungen und bei 5% bei Oktavmessungen.

Für Details der Messung bzw. Bestimmung des STI-Werts wird auf die umfangreichen Ausführungen in der DIN EN 60268-16 [62] verwiesen. Sowohl von der apparativen Ausstattung her als auch hinsichtlich der Messdurchführung erfordert der STI deutlich mehr Aufwand und Erfahrung als andere akustische Messungen. Grundlage der Betrachtung ist der Frequenzbereich von 125 Hz bis 8 000 Hz.

5 Anforderungen und Empfehlungen

5.1 Gesetzliche Grundlagen

Raumakustische Anforderungen an Gebäude sind in Deutschland nicht generell baurechtlich vorgegeben. Letztlich bleibt es jedem Besitzer, Bauherrn oder Betreiber eines Gebäudes überlassen, welche raumakustischen Bedingungen in den Räumen eines Gebäudes herrschen. Im Gegensatz zu prestigeträchtigen Bauvorhaben, wie Parlamenten, Konzertsälen oder Theatern, wird in Räumen des alltäglichen Aufenthalts, wie privaten Wohnräumen, aber auch Schulen, Büros und anderen Arbeitsstätten, die Raumakustik in der Planung kaum oder auch gar nicht beachtet. Die Ursache hierfür ist nur schwer nachvollziehbar, zumal der Aufwand einer raumakustischen Planung im Allgemeinen überschaubar ist.

Jeder Planer ist gehalten, die allgemein anerkannten Regeln der Technik bei seiner Tätigkeit zu berücksichtigen. Aus der Rechtsprechung, beispielsweise im Bereich des baulichen Schallschutzes, ist bekannt, dass ein Abweichen von den allgemein anerkannten Regeln der Technik gegenüber dem Auftraggeber bzw. Bauherrn zu begründen ist. Inwieweit dies bei komplexen Sachverhalten gelingen kann bzw. in welcher Detailtiefe durchgeführt werden muss, ist eine nicht endgültig geklärte Rechtsfrage. Es ist allerdings zweifelhaft, ob ein akustischer Laie über entsprechende Sachverhalte in einer angemessenen Art und Weise informiert werden kann, um die Vor- und Nachteile der Durchführung oder Nicht-Durchführung einer raumakustischen Planung vollständig gegeneinander abwägen zu können.

Im Bereich der Raumakustik kann die DIN 18041 »Hörsamkeit in Räumen - Anforderungen, Empfehlungen und Hinweise für die Planung« [52] nach weit verbreiteter Ansicht vieler Fachleute als allgemein anerkannte Regel der Technik angesehen werden. Die DIN 18041 wurde erstmalig im Jahr 1968 mit dem Titel »Hörsamkeit in kleinen und mittelgroßen Räumen« [50] veröffentlicht. Diesen Titel trug auch die Ausgabe des Jahres 2004 [51]. Mit der Neufassung

der DIN 18041 [52] im März 2016 wurden einige Änderungen und Ergänzungen umgesetzt, um beispielsweise das Thema Inklusion in Schulen besser abzubilden. Bestehende Unsicherheiten der Interpretationsmöglichkeiten wurden beseitigt. Die wesentliche Änderung der Neufassung aus dem Jahr 2016 gegenüber der Fassung aus dem Jahr 2004 wurde bei den Räumen der Gruppe B vollzogen, siehe hierzu Ziffer 5.2.1. Die Überarbeitung der DIN 18041 erfolgte nahezu parallel zur Fortschreibung der Richtlinie VDI 2569 »Schallschutz und akustische Gestaltung im Büro« [191]. Hierbei erfolgte ein Abgleich der beiden Regelwerke. Die Neufassung der Richtlinie VDI 2569 wurde im Januar 2017 zur Veröffentlichung final beschlossen [193].

Neben den baulichen Anforderungen an die raumakustische Gestaltung lassen sich aus anderen Zusammenhängen, Regelwerken und gesetzlichen Vorgaben Anforderungen an die Raumakustik ableiten. Dies ist mitunter jedoch eine rechtliche Frage, die nicht im Rahmen dieses Buchs vertieft werden soll. Die folgenden Beispiele zeigen entsprechende Herangehensweisen auf.

Durch die Bekanntmachung der Technischen Regel ASR A3.7 »Lärm« [179] im Mai 2018 sind im Bereich des Arbeitsschutzes erstmals konkrete Vorgaben zur Raumakustik von Arbeitsstätten beschrieben worden. Diese werden in Abschnitt 5.3 vorgestellt und im Vergleich mit den zuvor genannten Regelwerken diskutiert.

Die Unfallverhütungsvorschrift Kindertageseinrichtungen [41] führt zum Thema Bau- und Raumakustik an, dass entsprechend der Nutzung bau- und raumakustische Anforderungen einzuhalten sind, führt aber nicht aus, welche. Auch die Regeln und Vorgaben des barrierefreien Bauens sowie zur Inklusion und Teilhabe können dahingehend ausgelegt werden, dass Räume auch für Menschen mit Beeinträchtigungen des Hörsinns entsprechend vorzubereiten sind, um so allen Menschen eine angemessene Nutzung zu ermöglichen. Diese Auffassung wird aktuell durch den Leitfaden Barrierefreies Bauen des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) [22] unterstrichen. Auch hier wird die DIN 18041 als allgemein anerkannte Regel der Technik aufgeführt.

Aus Richtung des Arbeitsschutzes werden in anderen Zusammenhängen Schutzziele definiert, die sich auf die Gestaltung eines Arbeitsplatzes beziehen. Diese

recht allgemein gehaltene Herangehensweise führt dann bezüglich der Raumakustik zu Vorgaben zur Ausstattung der Räume mit schallabsorbierenden oder auch schallschirmenden Elementen. Die maximalen Grenzwerte der Arbeitsstättenverordnung [10] sowie der Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung [122] verfolgen das Ziel, aurale Gehörschäden zu vermeiden. Bei einem Beurteilungspegel am Arbeitsplatz von 80 dB und mehr sind den Mitarbeitern Unterweisungen, Vorsorgeuntersuchungen und Gehörschutz anzubieten und ab 85 dB sogar zwingend vorgeschrieben. Bei einem Beurteilungspegel ab 85 dB und mehr muss weiterhin ein Lärmminderungsplan durch den Arbeitgeber erstellt werden.

Im Bereich der extraauralen Wirkungen ist die Angabe eines Grenz- oder auch nur Richtwerts für den Beurteilungspegel in der Regel nicht zielführend. Weitere Eigenschaften des Schalls, wie beispielsweise die Verstehbarkeit von Sprache, ausgedrückt durch den Sprachübertragungsindex, gewinnen somit an Bedeutung. Sicherlich ist die Empfehlung eines Pegels eine Voraussetzung, aber nicht alleiniges Kriterium für eine angemessene Akustik. Grenzwerte für die Lärmbelastung für Arbeitsstätten wie Büros und Schulen sind nun erstmalig durch die ASR 3.7. [179] vorgegeben worden. In den weiteren Regelwerken handelt es sich ansonsten um Empfehlungen und Hinweise, deren Einhaltung mitunter eine gezielte Gestaltung der Raumakustik voraussetzt.

Ebenfalls erhält die Raumakustik eine Bedeutung im Rahmen der Zertifizierung von Gebäuden, wie sie beispielsweise durch die Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen – DGNB e.V. oder das Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen für Bundesgebäude (BNB) des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) gegeben sind. In den entsprechenden Kriteriensteckbriefen wird die Raumakustik im Bereich der soziokulturellen Qualität als »Akustischer Komfort« bezeichnet und trägt bei Unterrichtsgebäuden beim BNB mit 1,5% immerhin doppelt soviel zur Gesamtbewertung bei wie die »Kunst am Bau«. Die Frage, wie die Nachhaltigkeit eines Gebäudes, das aufgrund völlig unzureichender raumakustischer Bedingungen nicht oder nur erschwert genutzt werden kann, zu bewerten ist, ist nicht Thema dieses Buchs. Die Steckbriefe der genannten Zertifizierungssysteme beziehen sich in Teilen auf die DIN 18041 [52] wie auch auf die VDI 2569 [191].

In den folgenden Abschnitten werden die Anforderungen und Empfehlungen aus der aktuell gültigen DIN 18041 [52] aus dem Jahr 2016, der Neufassung der VDI 2569 [193] sowie einige weitere Regelwerke mit Bezug zu den Räumen des Alltags aufgeführt und kommentiert. Diese Regelwerke können als Grundlage und Voraussetzung für die raumakustische Planung, die in Kapitel 6 vorgestellt wird, angesehen werden.

5.2 Normen

In diesem Abschnitt werden die DIN 18041 »Hörsamkeit in Räumen – Anforderungen, Empfehlungen und Hinweise für die Planung« [52] und die Neufassung der Richtlinie VDI 2569 »Schallschutz und akustische Gestaltung im Büro« [193] als maßgebliche Regelwerke zur Akustik von Alltagsräumen zusammengefasst.

5.2.1 DIN 18041 »Hörsamkeit in Räumen«

Die DIN 18041 wurde im Jahre 1968 erstmals mit dem Titel »Hörsamkeit in kleinen bis mittelgroßen Räumen« veröffentlicht. Schon in dieser ersten Fassung wurde auf den grundlegenden Unterschied zwischen der Nutzung von Räumen für Sprache und Musik hingewiesen und so wurden entsprechend zwei Nutzungsarten definiert. Die Norm fasste das schon damals bekannte Wissen im Bereich der Raumakustik zusammen und beruhte damit auf einer Vielzahl der unter Ziffer 3.1 zitierten Quellen.

Im Folgenden wird die Fassung der DIN 18041 [52] aus dem Jahr 2016 mit dem Titel »Hörsamkeit in Räumen – Anforderungen, Empfehlungen und Hinweise für die Planung« vorgestellt. Wichtige akustische Voraussetzung ist weiterhin ein niedriger Gesamtstör Schalldruckpegel $L_{NA, Bau}$ (siehe Ziffer 3.2). Die bauakustischen Anforderungen werden in der DIN 18041 nur kurz angeführt. Ansonsten wird auf die einschlägigen Regelwerke und gesetzlichen Vorgaben zur Bauakustik wie die DIN 4109 [53] verwiesen.

Vorweg ist der in der Norm definierte und schon im Titel verwendete Begriff der Hörsamkeit zu erwähnen. Folgende Definition führt die DIN 18041 an:

»Hörsamkeit – Eignung eines Raumes für bestimmte Schalldarbietungen, insbesondere für angemessene sprachliche Kommunikation und musikalische Darbietung an den für die Nutzung des Raumes vorgesehenen Orten.«

Als Anmerkung zum Begriff wird weiterhin angeführt:

»Die Hörsamkeit eines Raumes wird vorwiegend durch die geometrische Gestaltung des Raumes, die Auswahl und Verteilung schallabsorbierender und schallreflektierender Flächen, die Nachhallzeit und den Gesamtstörschalldruckpegel beeinflusst.«

Diese Definition der Hörsamkeit eines Raums ist seit der ersten Ausgabe des Jahres 1968 unverändert geblieben. Anhand der Definition des Begriffs Hörsamkeit wird deutlich, dass es sich um eine Raumeigenschaft handelt.

Allgemein gilt die Norm für Räume mit Volumina bis maximal ca. 5 000 m³ sowie für Sport- und Schwimmhallen bis ca. 30 000 m³. Es werden Anforderungen und Empfehlungen zur raumakustischen Planung formuliert sowie Hinweise zur Umsetzung gegeben. Für Räume mit Volumina bis maximal 30 000 m³ kann die Norm sinngemäß angewandt werden.

Die DIN 18041 bezieht sich explizit nicht auf Räume mit speziellen Anforderungen an die Raumakustik. Als Beispiele für derartige Räume werden Theater, Konzertsäle, Kinos, Sakralräume sowie Räume zur hochwertigen Aufnahme von Musik und Sprache (z. B. Studios, Regieräume für Funk, Film, Fernsehen und Tonträgerproduktionen) genannt. Die Anforderungen der DIN 18041 können aber für Räume für allgemeine Musikdarbietungen, Mehrzweckräume (z. B. Stadthallen) sowie für Räume mit größerem Volumen bis ca. 30 000 m³ sinngemäß angewandt werden. Explizit ausgeschlossen werden im Anwendungsbereich der DIN 18041 Wohnungen und Wohnräume.

In der DIN 18041 [52] werden prinzipiell zwei Gruppen von Räumen unterschieden:

- Gruppe A – Anforderungen an die Hörsamkeit über mittlere und größere Entfernungen wie z. B. Unterrichtsräume in Schulen, Gruppenräume in Kindertageseinrichtungen, Konferenzräume, Gerichts- und Ratssäle, Seminarräume, Hörsäle, Tagungsräume, Räume in Seniorentagesstätten, Sport- und Schwimmhallen

- Gruppe B – Empfehlungen für die Hörsamkeit über geringe Entfernungen wie z. B. Verkehrsflächen mit Aufenthaltsqualität, Speiseräume, Kantinen, Spielfläure und Umkleiden in Schulen und Kindertageseinrichtungen, Ausstellungsräume, Eingangshallen, Schalterhallen, Büros

Ein wesentlicher Unterschied zwischen diesen beiden Gruppen besteht darin, dass bei Räumen der Gruppe A eine Anforderung an die frequenzabhängige Nachhallzeit formuliert und bei Räumen der Gruppe B lediglich die Absorptionsfläche bezogen auf das jeweilige Raumvolumen als Empfehlung für vier Oktaven vorgegeben wird. In beiden Gruppen werden die jeweiligen Räume bzw. Raumtypen fünf Nutzungsarten zugeordnet. Beispiele für Räume sind jeweils angegeben. Die Unterscheidung in zwei Gruppen erfolgte bereits in der ersten Fassung der DIN 18041 im Jahr 1968 [50], dort noch als Gruppe 1 und 2 bezeichnet. Nachfolgend werden die aktuellen Vorgaben nach DIN 18041 [52] für die beiden Gruppen beschrieben.

Räume der Gruppe A

Neben architektonisch-gestalterischen Aspekten sowie anderen bauphysikalischen Eigenschaften – wie Temperatur, Beleuchtung, Luftfeuchte etc. – sind die Raumgeometrie, -größe und -ausstattung die grundlegenden Eigenschaften zur Schaffung einer guten Hörsamkeit der Räume der Gruppe A. Die Räume der Gruppe A stellen dabei selbstverständlich auch die Hörsamkeit über geringe Entfernungen sicher.

In den Räumen der Raumgruppe A ist das akustisch aufeinander abgestimmte Zusammenwirken von Raumgeometrie, -größe und -ausstattung sowie dem Gesamtstörschalldruckpegel von besonderer Bedeutung. Hierzu tragen die Position der Schallquelle, meist der Sprecher, die Übertragung durch den Raum sowie auch die Hörposition bei. Nachhall, Schallreflexionen und Störgeräusche sind wesentliche Einflussfaktoren auf die Hörsamkeit. Zu langer Nachhall, einzelne starke Reflexionen oder auch zu hohe Störgeräusche mindern die Hörsamkeit.

Für Räume der Gruppe A werden fünf Nutzungsarten, mit A1 bis A5 bezeichnet, unterschieden. Diese Nutzungsarten entsprechen weitgehend den bislang verwendeten, historischen Bezeichnungen, die in der neuen Fassung der DIN 18041 [52] als Kurzbezeichnungen angeführt werden.

Nutz.-art		Kurzbez. und Beschr. der Nutzungsart	Subjektive Wahrnehmung	Beispiele
A1		»Musik« vorwiegend musikalische Darbietungen	Gute Hörbarkeit für unverstärkte Musik. Sprachliche Darbietungen sind nur mit gewissen Einschränkungen der Sprachverständlichkeit möglich.	Musikraum mit aktivem Musizieren und Gesang
A2		»Sprache / Vortrag« – sprachliche Darbietungen stehen im Vordergrund, in der Regel von einer (frontalen) Position. Gleichzeitige Kommunikation zwischen mehreren Personen an verschiedenen Stellen im Raum wird selten durchgeführt.	Sprachliche Darbietungen einzelner Sprecher erzielen eine hohe Sprachverständlichkeit. Musikal. Darbietungen werden in der Regel als zu transparent und klar empfunden, jedoch günstig für musikal. Probenarbeit.	Gerichts- und Ratssaal, Gemeindesaal, Hörsaal, Versammlungsraum, Schulaula
A3		»Sprache / Vortrag inklusiv« Räume der Nutzungsart A2 für Personen, die in besonderer Weise auf gutes Sprachverstehen angewiesen sind Erforderlich für inklusive Nutzung ^a	Sprachliche Darbietungen einzelner Sprecher erzielen eine hohe Sprachverständlichkeit, auch für Personen mit Hörschrankungen oder bei z. B. frendsprachlicher Nutzung.	Gerichts- und Ratssaal, Gemeindesaal, Hörsaal, Versammlungsraum, Schulaula
A4		»Unterricht / Kommunikation« kommunikationsintensive Nutzungen mit mehreren gleichzeitigen Sprechern verteilt im Raum	Sprachliche Kommunikation ist mit mehreren (teilweise gleichzeitigen) Sprechern möglich.	identisch zu A4
A5		»Sport« – In Sport- und Schwimmhallen kommunizieren mehrere Gruppen (auch gleichzeitig) mit unterschiedlichen Inhalten	Sprachliche Kommunikation ist mit mehreren (teilweise gleichzeitigen) Sprechern möglich, auch für Personen mit Hörschrankungen oder bei z. B. frendsprachlicher Nutzung.	Unterrichtsraum, Differenzierungsraum, Tagungsraum, Besprechungsraum, Konferenzraum, Seminarraum Gruppenraum in Kindertageseinrichtungen, Pflegeeinrichtungen und Seniorenheimen
			Sprachliche Kommunikation über kurze Entfernungen ist im Allgemeinen gut möglich.	Sport- und Schwimmhallen für nahezu ausschließliche Nutzung als Sportstätte

^a Aus dem Behindertengleichstellungsgesetz, vergleichbaren Landesregelungen und der UN-Konvention über die Rechte von Menschen mit Behinderungen ergibt sich, dass der Öffentlichkeit zugängliche Neubauten inklusiv zu errichten sind, soweit dies nicht nur mit einem unverhältnismäßigen Mehraufwand erfüllt werden kann. Näheres ist den jeweiligen Landesgesetzen zu entnehmen.

Tabelle 5.1 Übersicht der Nutzungsarten A1 bis A5 für Räume der Gruppe A nach DIN 18041 [52].

Hierbei entspricht die Nutzungsart A1 der bisherigen Nutzungsart »Musik«, A2 der Nutzungsart »Sprache«, A3 der Nutzungsart »Unterricht« und A5 der bisherigen Nutzungsarten »Sport 1« und »Sport 2«. Die neue Nutzungsart A4 entspricht dem Hinweis in der alten Fassung der DIN 18041, dass von Personen mit Hörschäden die raumakustische Situation für Sprachkommunikation umso günstiger empfunden wird, je kürzer die Nachhallzeit ist.

An der Sprachkommunikation in Räumen müssen auch Personen mit einem eingeschränkten Hörvermögen teilnehmen können. Je nach Grad der Schwerhörigkeit sind hierbei weitere Aspekte und technische Ausstattungen der Räume zu beachten.

In der Tabelle 5.1 ist die Tabelle 1 der DIN 18041 [52] wiedergegeben. Für jede der fünf Nutzungsarten A1 bis A5 ist neben der Kurzbezeichnung und Beschreibung der Nutzungsart ebenfalls die zu erwartende subjektive Wahrnehmung knapp beschrieben. Beispiele von Räumen sollen die Zuordnung zu den Nutzungsarten erleichtern.

Folgende allgemeine Beschreibungen können für die vorwiegenden Nutzungen und Erwartungen der Nutzer an die Hörsamkeit für Räume der jeweiligen Nutzungsarten aufgeführt werden.

A1 »Musik«

Diese Nutzungsart bezieht sich auf Räume, die vorwiegend für unverstärkte Musik genutzt werden. Verstärkte Musik ist häufig mit Effekten wie einer Verhallung versehen und benötigt eher kürzeren Nachhall. Die Nutzer können erwarten, dass die Räume schwerpunktmäßig eine gute Hörsamkeit für Musik aufweisen und nehmen in Kauf, dass sprachliche Darbietungen nur mit gewissen Einschränkungen der Sprachverständlichkeit möglich sind.

A2 »Sprache/Vortrag«

Die Nutzungsart A2 bezieht sich auf Räume, in denen sprachliche Ereignisse im Vordergrund der Nutzung stehen, jedoch nur in geringem Umfang oder keine Kommunikation zwischen mehreren Personen gleichzeitig an verschiedenen Stellen im Raum stattfindet. Es wird davon ausgegangen, dass die Position des Sprechers weitgehend fest oder in einem kleinen Bereich des Raums

liegt. Die Nutzer erwarten, dass das Zuhören eines einzelnen Sprechers mühelos möglich ist. Musikalische Darbietungen werden von den Nutzern in der Regel als zu transparent und klar empfunden.

A3 »Sprache/Vortrag inklusiv« und »Unterricht/Kommunikation«

Die Nutzungsart A3 ist für Räume zu verwenden, in denen kommunikationsintensive Nutzungen mit mehreren gleichzeitigen Sprechern verteilt im Raum stattfinden. Die Nutzer können davon ausgehen, dass auch bei längerer Dauer entsprechende Aktivitäten ohne Belästigung möglich sind. Für Personen mit Höreinschränkungen ist diese Nutzungsart für Vortragssituationen, gegebenenfalls in Kombination mit technischen Hilfsmitteln, erforderlich. Unverstärkte Musik kann mitunter zu klar und präsent sein.

A4 »Unterricht/Kommunikation inklusiv«

Die Nutzungsart A4 ist für Räume zu verwenden, in denen kommunikationsintensive Nutzungen mit mehreren gleichzeitigen Sprechern verteilt im Raum stattfinden und Personen mit Hörbeeinträchtigungen an der Kommunikation teilnehmen. Alle Nutzer können davon ausgehen, dass auch bei längerer Dauer entsprechende Aktivitäten ohne große Anstrengung und Beeinträchtigung möglich sind.

A5 »Sport«

Die Nutzungsart »Sport« ist für Sport- und Schwimmhallen ohne Publikum mit Nutzung durch eine Gruppe gedacht. Kommunikation findet in der Regel nur über kurze Distanzen innerhalb der Gruppe oder durch einen Sprecher statt.

Zusammengefasst kann gesagt werden, dass die Zuordnung zu den Nutzungsarten letztlich anhand der Intensität der kommunikativen Nutzungen im jeweiligen Raum erfolgt. In der Tabelle 5.1 sind Beispiele von Räumen für die verschiedenen Nutzungsarten zusammengestellt. Nach dem Hinweis der DIN 18041 sind vergleichbare Räume sinngemäß zuzuordnen. Hierbei kann folgender Gedanke die Zuordnung unterstützen: Je mehr Kommunikation innerhalb des Raums oder aber auch aus dem Raum heraus und hinein (Beispiel: Video-Konferenzraum) stattfindet, desto kürzer sollte die Nachhallzeit sein. Je weniger Nutzungsanteile mit sprachlicher Kommunikation auftreten, desto länger kann der Zielwert der Nachhallzeit gewählt werden.

Von Personen mit Hörschäden wird die raumakustische Situation für Sprachkommunikation umso günstiger empfunden, je kürzer die Nachhallzeit ist. Dasselbe gilt auch für die Kommunikation in einer Sprache, die nicht als Muttersprache gelernt wurde, und für die Kommunikation mit Personen, die auf andere Weise einen Bedarf nach erhöhter Sprachverständlichkeit haben, z. B. Personen mit Sprach- oder Sprachverarbeitungsstörungen, Konzentrations- bzw. Aufmerksamkeitsstörungen oder Leistungsbeeinträchtigungen. Im Zweifelsfall sollten in Räumen zur Sprachinformation und Kommunikation eher kürzere als längere Nachhallzeiten realisiert werden.

Die Zuordnung zu den Nutzungsarten ist der erste Schritt der raumakustischen Planung, da anhand der Nutzungsart innerhalb der Räume der Gruppe A die anzustrebende Nachhallzeit festgelegt wird. Die zweite Größe zur Festlegung der Soll-Nachhallzeit ist neben der Nutzung das Raumvolumen.

Mit Hilfe der folgenden Gleichungen lassen sich in Abhängigkeit vom Raumvolumen V die empfohlenen Soll-Nachhallzeiten bei mittleren Frequenzen für die verschiedenen Nutzungsarten A1 bis A5 der Raumgruppe A berechnen. Die zugehörige Frequenzabhängigkeit wird relativ zu diesen Soll-Werten für 500 Hz bzw. 1 000 Hz angegeben. Es ist zu ergänzen, dass eine alleinige Betrachtung der Soll-Nachhallzeit ohne Berücksichtigung des Frequenzverlaufs nicht im Sinne der DIN 18041 [52] ist.

Für die Nutzungsart A1 »Musik« mit typischen Volumina zwischen 30 m^3 und $1\,000 \text{ m}^3$ gilt:

$$T_{\text{Soll, A1}} = \left(0,45 \log \frac{V}{\text{m}^3} + 0,07 \right) \text{ s} \quad 5.1$$

Für die Nutzungsart A2 »Sprache/Vortrag« mit typischen Volumina zwischen 50 m^3 und $5\,000 \text{ m}^3$ gilt:

$$T_{\text{Soll, A2}} = \left(0,37 \log \frac{V}{\text{m}^3} - 0,14 \right) \text{ s} \quad 5.2$$

Für die Nutzungsart A3 »Unterricht/Kommunikation« mit typischen Volumina zwischen 30 m^3 und $1\,000 \text{ m}^3$ und A3 »Sprache/Vortrag inklusiv« mit typischen Volumina zwischen 30 m^3 und $5\,000 \text{ m}^3$ gilt:

$$T_{\text{Soll, A3}} = \left(0,32 \log \frac{V}{\text{m}^3} - 0,17 \right) \text{ s} \quad 5.3$$

Für die Nutzungsart A4 »Unterricht/Kommunikation inklusiv« mit typischen Volumina zwischen 30 m³ und 500 m³ gilt:

$$T_{\text{Soll, A4}} = \left(0,26 \log \frac{V}{\text{m}^3} - 0,14 \right) \text{ s} \quad 5.4$$

Für die Nutzungsart A5 »Sport« mit typischen Volumina zwischen 200 m³ und 10 000 m³ gilt

$$T_{\text{Soll, A5}} = \left(0,75 \log \frac{V}{\text{m}^3} - 1,00 \right) \text{ s} \quad 5.5$$

und für Volumina größer 10 000 m³

$$T_{\text{Soll, A5}} = 2,0 \text{ s} \quad 5.6$$

In Abbildung 5.1 sind die geforderten Nachhallwerte aus den Gleichungen 5.1 bis 5.6 in Abhängigkeit von der Nutzungsart und dem Raumvolumen grafisch dargestellt. Die Bereiche der typischen Volumina sind als durchgezogene Linien dargestellt; punktiert sind untypische Volumina und strichpunktiert sind Richtwerte oberhalb von Volumina ab 5 000 m³. Im Sinne der DIN 18041 sind Räume mit Volumina von mehr als 5 000 m³ nur in Anlehnung an diese Norm zu planen. In solch großen Räumen ist generell zu empfehlen, dass ein Fachplaner für Raumakustik hinzugezogen wird. Die DIN 18041 gibt lediglich für Sport- und Schwimmhallen Anforderungen für Räume mit mehr als 5 000 m³ (siehe Nutzungsart A5).

Anwendung der Anforderungen DIN 18041 für Raumgruppe A:

Eine Schulaula mit einem Volumen von 1 500 m³ kann der Nutzungsart A2 oder auch A3 zugeordnet werden. Nach Gleichung 5.2 ergibt sich eine Soll-Nachhallzeit $T_{\text{Soll, A2}} = 1,04 \text{ s}$. Sofern die Belange von Personen mit Höreinschränkungen berücksichtigt werden sollen, ergibt sich für die Nutzungsart A3 $T_{\text{Soll, A3}} = 0,85 \text{ s}$. Die Entscheidung, ob die Belange der Inklusion zu berücksichtigen sind und damit auch Personen mit Höreinschränkungen den Raum nutzen können, ist entweder aus baurechtlicher Sicht, Stichwort »Barrierefreies Bauen«, zu bewerten oder von der Bauherrschaft zu entscheiden.

Die Frequenzabhängigkeit der Nachhallzeit wird ebenfalls in der DIN 18041 thematisiert. Für die Nutzungsarten A1 bis A4 wird ein Toleranzbereich im Frequenzbereich zwischen 125 Hz und 4 000 Hz definiert. Bezugsgröße ist die Nachhallzeit T_{Soll} der jeweiligen Nutzungsart. Der Toleranzbereich wird im für Sprache wichtigen Frequenzbereich zwischen 250 Hz und 2 000 Hz durch

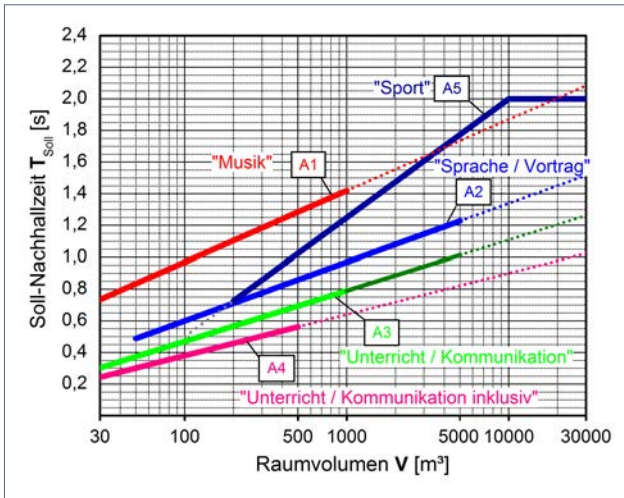


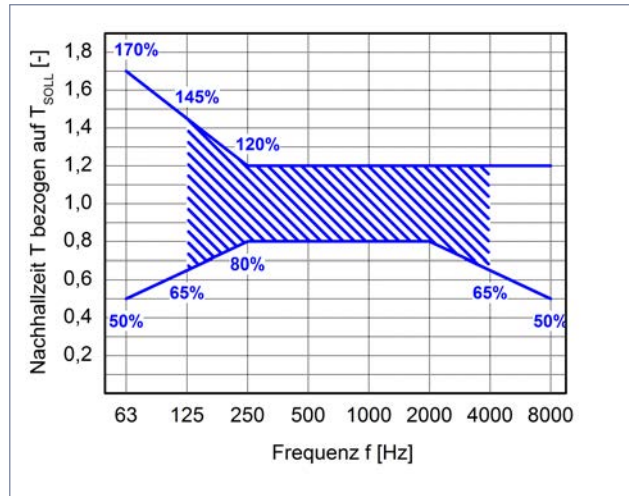
Abbildung 5.1 Geforderter Wert der Nachhallzeit T_{Soll} für Raumgruppe A nach DIN 18041 [52] für die Nutzungsarten A1 bis A5

eine Ober- bzw. Untergrenze von $\pm 20\%$ festgeschrieben. Für die Nutzungsart A5 »Sport« ist die Soll-Nachhallzeit mit einer Genauigkeit von $\pm 20\%$ um den Zielwert T_{Soll} zwischen 250 Hz und 2 000 Hz einzuhalten.

In Abbildung 5.2 ist der Toleranzbereich bezogen auf die Soll-Nachhallzeit der Nutzungsarten A1 bis A4 grafisch dargestellt. In der DIN 18041 sind die Toleranzbereiche über den verbindlichen Frequenzbereich der Norm hinausgehend auch für die Bereiche unterhalb von 100 Hz und oberhalb von 5 000 Hz als optionale Orientierungswerte angegeben. Diese Orientierungswerte sind in der Praxis der Räume des Alltags ohne Bedeutung.

Bei Mehrzwecknutzungen sind entsprechend den verschiedenen Nutzungsanteilen und deren Wertigkeit Zwischenwerte für die Soll-Nachhallzeit zu bestimmen. Hierbei sind in der Regel die Nutzer der Räume einzubeziehen. Dieser Hinweis in der Norm zeigt das klassische Problem der Raumakustik bei Mehrzwecknutzungen auf. Gegebenenfalls können die verschiedenen Sollwerte unterschiedlicher Nutzungsarten durch variable raumakustische Maßnahmen erreicht werden. In der Praxis sind variable Maßnahmen zur Änderung der Schallabsorption aufwendig, sodass es sich empfiehlt, einen Kompromiss für alle im Raum vorgesehenen Nutzungen zu finden.

Abbildung 5.2 Geforderter Toleranzbereich der Nachhallzeit in Abhängigkeit von der Frequenz für die Nutzungsarten A1 bis A4



Für Musikunterrichts- oder auch Musikprobenräume sind die Anforderungen an die Werte der Nachhallzeit in der Regel stark nutzungsabhängig. Nach Hinweis in der DIN 18041 liegen die Sollwerte typischerweise zwischen den Werten der Nutzungsarten A1 und A2. Erfahrungsgemäß sollen Unterrichtsräume für Musikschüler, beispielsweise für Gesang, Blockflöte oder andere eher leise Musikinstrumente, eher längere Nachhallzeiten zeigen, um die Unterstützung durch den Raum nutzen zu können. Räume für lautere Instrumente wie Blasinstrumente oder auch für das Ensemblespiel können sich an den Werten für die Nutzungsart A2 orientieren. Für sehr laute Aktivitäten wie Schlagwerk oder Bandproben sind auch die Werte der Nutzungsart A3 als Obergrenze zu sehen. Bei Räumen für Musiknutzungen ist in jedem Fall eine direkte Abstimmung mit den Nutzern der Räume zu empfehlen. Neben den rein akustischen Anforderungen im Sinne der DIN 18041 können hier weitergehende Erfordernisse, Erwartungen und Gewohnheiten der Nutzer die Festlegung von Zielwerten der Nachhallzeit bestimmen.

Abschließend ist zu den Räumen der Gruppe A anzumerken, dass sich die Anforderungen an die Nachhallzeit auf einen mit Personen besetzten Raumzustand beziehen. Im Rahmen der Überarbeitung der Norm wurde zur Umrechnung zwischen dem Raumzustand ohne und mit Personen ein Verfahren definiert, das im normativen Anhang A der DIN 18041 [52] dargestellt ist.

Beschreibung	Frequenz [Hz]					
	125	250	500	1000	2000	4000
Einzelne Person in einer Gruppe, stehend, 1 Person je 6m ² Fläche; typischer Höchstwert	0,12	0,45	0,80	1,20	1,30	1,40
Person sitzend auf ungepolsterter Bestuhlung	0,15	0,30	0,40	0,45	0,55	0,55
Person sitzend auf Leichtpolsterbestuhlung	0,10	0,15	0,20	0,25	0,25	0,25
Person sitzend auf Hochpolsterbestuhlung	0,05	0,05	0,05	0,10	0,10	0,15
Kind in Vorschuleinrichtungen	0,05	0,10	0,15	0,20	0,30	0,25
Schüler Primarstufe (bis 11 Jahre), sitzend an Tischen	0,05	0,10	0,20	0,35	0,40	0,45
Schüler Sekundarstufe, sitzend an Tischen	0,10	0,15	0,35	0,50	0,50	0,50

Tabelle 5.2 Zusätzliche Schallabsorptionsfläche je Person ΔA_{Person} in m² für die Oktaven von 125 Hz bis 4k Hz nach Anhang A, DIN 18041 [52].

Sowohl für den rechnerischen wie auch den messtechnischen Nachweis wird ein Verfahren eingeführt, das die Absorption von Personen im Raum berücksichtigt. Nachweis-Messungen zu den Anforderungen an die Nachhallzeit erfolgen in der Regel in betriebsbereiten und eingerichteten Räumen ohne Personen. Die Änderung der Absorptionsfläche des Raums durch die Anwesenheit von Personen kann dann anschließend rechnerisch berücksichtigt werden. Werte für die Absorptionsfläche von Personen sind in Anhang G der DIN 18041 dargestellt, siehe auch Tabelle 8.2 in Anhang 8.1 in diesem Buch. Diese Werte beziehen sich jeweils auf die dort angegebene Konstellation der Personen. Zur Umrechnung zwischen unbesetztem und besetztem Raumzustand ist lediglich die Differenz der Absorptionsfläche zu berücksichtigen. Beispielsweise ist diese Differenz bei einer stark gepolsterten Bestuhlung geringer als bei einer Bestuhlung ohne schallabsorbierende Polsterung. Diese Differenz bezogen auf eine Person wird im Anhang A der DIN 18041 beschrieben. Für die zusätzliche Schallabsorption durch Personen werden die in Tabelle 5.2 aufgeführten Werte vorgegeben.

Die Werte in Tabelle 5.2 beschreiben die Änderung der Absorptionsfläche ΔA durch eine Person. Es ist somit stets das Vielfache entsprechend der Personenzahl zu bilden. Dies ist insbesondere bei messtechnischen Nachweisen zur Nachhallzeit zu beachten. Bei rechnerischen Nachweisen anhand von Planunterlagen wird meist die Absorptionsfläche von Stühlen mit Personen berücksichtigt und daher keine differenzierte Betrachtung der Änderung durch die Schallabsorption der Person allein notwendig. Ein Beispiel zur Berechnung der Nachhallzeit im Sinne der DIN 18041 ist im Abschnitt 6.3 beschrieben.

Räume der Gruppe B

Für Räume der Gruppe B, bei denen die Hörsamkeit nur über geringe Entfernungen zu gewährleisten ist, werden keine Anforderungen an die Nachhallzeit definiert. Es werden Maßnahmen zur Raumbedämpfung empfohlen. Hierzu wird das Verhältnis der gesamten äquivalenten Absorptionsfläche im Raum (siehe Seite 84) und dem Raumvolumen V , im Folgenden A/V -Verhältnis, verwendet. Die in der DIN 18041 beschriebenen Empfehlungen dienen dem Zweck, eine angemessene Sprachkommunikation über geringe Entfernungen sicherzustellen. Dies wird über eine Erhöhung der Schallabsorption bzw. Absenkung der Nachhallzeit und einer damit ausgelösten Minderung des Gesamtstörchallpegels erreicht.

Analog dem Vorgehen bei der Raumgruppe A werden auch bei den Räumen der Gruppe B fünf Nutzungsarten B1 bis B5 definiert. Diese gegenüber den vorherigen Ausgaben der DIN 18041 neu eingeführte Unterscheidung orientiert sich an der Aufenthaltsdauer sowie dem notwendigen Grad der Lärminderung in dem jeweiligen Raumtyp. Von Räumen ohne Aufenthaltsqualität, Nutzungsart B1, bis hin zu Räumen mit einem besonderen Bedarf an Lärminderung und akustischem Raumkomfort, B5, reicht die Einteilung.

Gegenüber der Ausgabe der DIN 18041 aus dem Jahr 2004 [51] ist hier eine deutliche Erweiterung und Differenzierung der betrachteten Räume vollzogen worden. Die Tabelle 5.3 gibt Tabelle 2 der DIN 18041 [52] wieder. In der Tabelle sind Beispiele für entsprechende Räume angeführt. Vergleichbare Räume sind sinngemäß den entsprechenden Nutzungsarten zuzuordnen. Bei Räumen mit mehreren Nutzungen ist abzuwägen, welche die Hauptnutzung ist.

Nutzungsart	Beschreibung	Beispiele
B1	Räume ohne Aufenthaltsqualität	Eingangshallen, Flure, Treppenhäuser u. Ä. als reine Verkehrsfläche (ausgenommen Verkehrsflächen in Schulen, Kindertageseinrichtungen, Krankenhäusern und Pflegeeinrichtungen)
B2	Räume zum kurzfristigen Verweilen	Eingangshallen, Flure, Treppenhäuser u. ä. Verkehrsflächen mit Aufenthaltsqualität (Empfangsbereich mit Wartezonen etc.), Ausstellungsräume, Schalterhallen, Umkleiden in Sporthallen
B3	Räume zum längerfristigen Verweilen	Ausstellungsräume mit Interaktivität oder erhöhtem Geräuschaufkommen (Multimedia, Klang-/Videokunst etc.), Verkehrsflächen in Schulen und Kindertageseinrichtungen (Kindergarten, Kinderkrippe, Hort etc.), Verkehrsflächen mit Aufenthaltsqualität in Krankenhäusern und Pflegeeinrichtungen (z. B. offene Wartezonen), Patientenwarteräume, Pausenräume, Bettenzimmer, Ruheräume, Operationssäle, Behandlungsräume, Untersuchungsräume, Sprechzimmer, Speiseräume, Kantinen, Labore, Bibliotheken, Verkaufsräume
B4	Räume mit Bedarf an Lärminderung und Raumkomfort	Rezeption/Schalterbereich mit ständigem Arbeitsplatz, Labore mit ständigem Arbeitsplatz, Ausleihbereiche von Bibliotheken, Ausgabebereiche in Kantinen, Bewohnerzimmer in Pflegeeinrichtungen, Bürgerbüro, Büroräume ^{a,b}
B5	Räume mit besonderem Bedarf an Lärminderung und Raumkomfort	Speiseräume und Kantinen in Schulen, Kindertageseinrichtungen (Kindergarten, Kinderkrippe, Hort etc.), Krankenhäusern und Pflegeeinrichtungen, Arbeitsräume mit besonders hohem Geräuschaufkommen (z. B. Werkstätten, Werkräume, Großküchen, Spülküchen), Callcenter ^a , Leitstellen, Sicherheitszentralen, Intensivpflegebereiche, Wachstationen, Bewegungsräume in Kindertageseinrichtungen, Spielflure und Umkleiden in Schulen und Kindertageseinrichtungen (Kindergarten, Kinderkrippe, Hort etc.)
^a Empfehlungen für Büroräume sowie Callcenter werden ausführlich in der Richtlinie VDI 2569 »Schallschutz und akustische Gestaltung« [192] behandelt. ^b Einzelbüros können unter Nutzungsart B3 eingeordnet werden.		

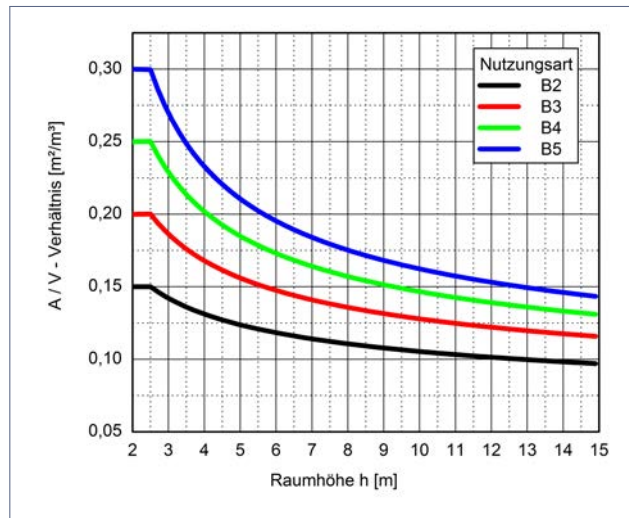
Tabelle 5.3 Übersicht der Nutzungsarten B1 bis B5 der Raumgruppe B nach DIN 18041 [52].

Nutzungsart	bei Raumhöhen $h \leq 2,5 \text{ m}$	bei Raumhöhen $h > 2,5 \text{ m}$
B1	ohne Anforderung	ohne Anforderung
B2	$A/V \geq 0,15$	$A/V \geq [4,80 + 4,69 \lg(h/1 \text{ m})]^{-1}$
B3	$A/V \geq 0,20$	$A/V \geq [3,13 + 4,69 \lg(h/1 \text{ m})]^{-1}$
B4	$A/V \geq 0,25$	$A/V \geq [2,13 + 4,69 \lg(h/1 \text{ m})]^{-1}$
B5	$A/V \geq 0,30$	$A/V \geq [1,47 + 4,69 \lg(h/1 \text{ m})]^{-1}$

Tabelle 5.4 Orientierungswerte für das mindestens erforderliche A/V-Verhältnis für die Nutzungsarten B1 bis B5 nach DIN 18041 [52].

Für die fünf Nutzungsarten B1 bis B5 werden Orientierungswerte für das mindestens erforderliche A/V-Verhältnis vorgegeben. Diese Orientierungswerte sind in den einzelnen Oktaven von 250 Hz und 2000 Hz einzuhalten. Im Sinne der DIN 18041 ist bei Räumen der Gruppe B eine frequenzabhängige Betrachtung zwingend notwendig. Anders als bei den Räumen der Gruppe A wird lediglich der für Sprache wichtige Frequenzbereich zwischen 250 Hz und 2000 Hz verwendet.

Abbildung 5.3 Mindestens erforderliche Werte für das A/V-Verhältnis für Raumgruppe B nach DIN 18041 [52] für die Nutzungsarten B2 bis B5



In Abbildung 5.3 sind die Orientierungswerte für das mindestens erforderliche A/V-Verhältnis grafisch in Abhängigkeit von der lichten Raumhöhe h dargestellt. Deutlich zu erkennen ist das durch die Formeln in Tabelle 5.4 beschriebene Absinken des A/V-Verhältnisses.

Mit dem Frequenzbereich von 250 Hz bis 2000 Hz wird der für Sprache wichtige Frequenzbereich abgedeckt. Die Orientierungswerte sind bis zu einer Raumhöhe von 2,5 m als fester Mindestwert vorgegeben (siehe Tabelle 5.4). Für größere Raumhöhen erfordert ein fest vorgegebenes A/V-Verhältnis in der Regel sehr große Absorptionsflächen. Aus diesem Grund wird das A/V-Verhältnis in Abhängigkeit von der Raumhöhe h abgesenkt (siehe zweite Spalte für Raumhöhen $h > 2,5$ m in Tabelle 5.4.) Bei der Ermittlung der Absorptionsfläche im Raum A sind sämtliche absorbierenden Flächen und Objekte zu berücksichtigen. Lediglich die Absorption durch Personen im Raum ist nicht zu berücksichtigen.

Die lichte Raumhöhe h entspricht der im Raum messbaren Höhe, sofern der Raum nur eine Deckenhöhe aufweist. Die mittlere lichte Raumhöhe h kann berechnet werden, indem das Raumvolumen durch die Nettogrundfläche des Raumes geteilt wird. Bei mehrgeschossigen Räumen, wie Atrien mit angeschlossenen Gängen, ist die gesamte Raumhöhe zu verwenden. Eine etagenweise Betrachtung in einzelnen Zonen kann ebenfalls sinnvoll sein und führt zu einer größeren benötigten Absorptionsfläche A bezogen auf das Raumvolumen V. Dies ist im Sinne der Lärminderung zu begrüßen. Bei Räumen mit mehreren Deckenhöhen oder schrägen Decken sind sinnvolle Mittelwerte für die lichte Raumhöhe oder aber eine zonenweise Betrachtung zu wählen. Weitere Hinweise und Beispiele zur Bestimmung der lichten Raumhöhe sind im Kommentar zur DIN 18041 [161] zu finden.

Anwendung der Gleichungen aus Tabelle 5.4:

Eine Schalterhalle mit ständig besetzten Arbeitsplätzen, z.B. in einem Bahnhof, ist der Nutzungsart B4 zuzuordnen. Bei einer konstanten lichten Raumhöhe $h = 4$ m beträgt das mindestens erforderliche A/V-Verhältnis

$$A/V \geq [2,13 + 4,69 \lg(4 \text{ m}/1 \text{ m})]^{-1} = 0,20$$

Bei einer Grundfläche von 400 m^2 ergibt sich ein Raumvolumen $V = 1\,600 \text{ m}^3$. Um das Verhältnis $A/V = 0,20$ zu erreichen ist somit eine Absorptionsfläche im Raum A von $1\,600 \times 0,20 = 320 \text{ m}^2$ notwendig. Bei Verwendung eines Schallabsorbers mit einem α_s -Wert von 0,80 ist somit eine Absorberfläche an den Wänden oder der Decke des Raums von 400 m^2 ($320 \text{ m}^2/0,80$) einzubringen. Dies entspricht der kompletten Deckenfläche. Wird ein Schallabsorber mit einem geringeren Absorptionsgrad verwendet, so erhöht sich die benötigte Absorberfläche. Zu beachten ist, dass auch die Einrichtung und weitere Flächen im Raum zur Gesamtabsorptionsfläche A im Raum beitragen.

Aus dem Mindest-A/V-Verhältnis kann die maximale Nachhallzeit im Raum abgeleitet werden. In Abbildung 5.4 sind die entsprechenden Werte für die maximale Nachhallzeit in Abhängigkeit von der Raumhöhe h dargestellt. Auch diese Werte sind im Frequenzbereich von 250 Hz bis 2000 Hz in den einzelnen Oktaven nachzuweisen.

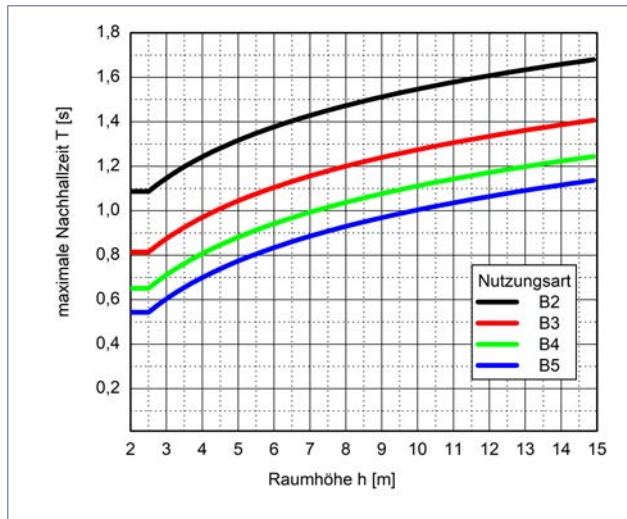


Abbildung 5.4 Maximale Werte der Nachhallzeit T für die Nutzungsarten B2 bis B5

Maßnahmen Räume Gruppe A

Auch in der Neufassung der DIN 18041 [52] ist eine Reihe von Vorschlägen insbesondere auch zur Positionierung der schallabsorbierenden Flächen im Raum aufgeführt. Diese Vorschläge werden in der DIN 18041 rein formal nur für Räume der Gruppe A angeführt, gelten allerdings auch allgemein und sind daher auch für Räume der Gruppe B anzuwenden. Im Hinblick auf die Verteilung der schallabsorbierenden Flächen ist eine möglichst gleichmäßige Verteilung auf den Raumbooberflächen anzustreben. In Abbildung 5.5 sind Skizzen zur ungünstigen und günstigen Positionierung der schallabsorbierenden Anteile von Decken und Wänden dargestellt.

Da sich Schall immer dreidimensional, also in alle Raumrichtungen ausbreitet, ist es dringend angeraten, dass Flächen in mindestens zwei, idealerweise in allen drei Raumrichtungen mit Schallabsorbern zu belegen sind.

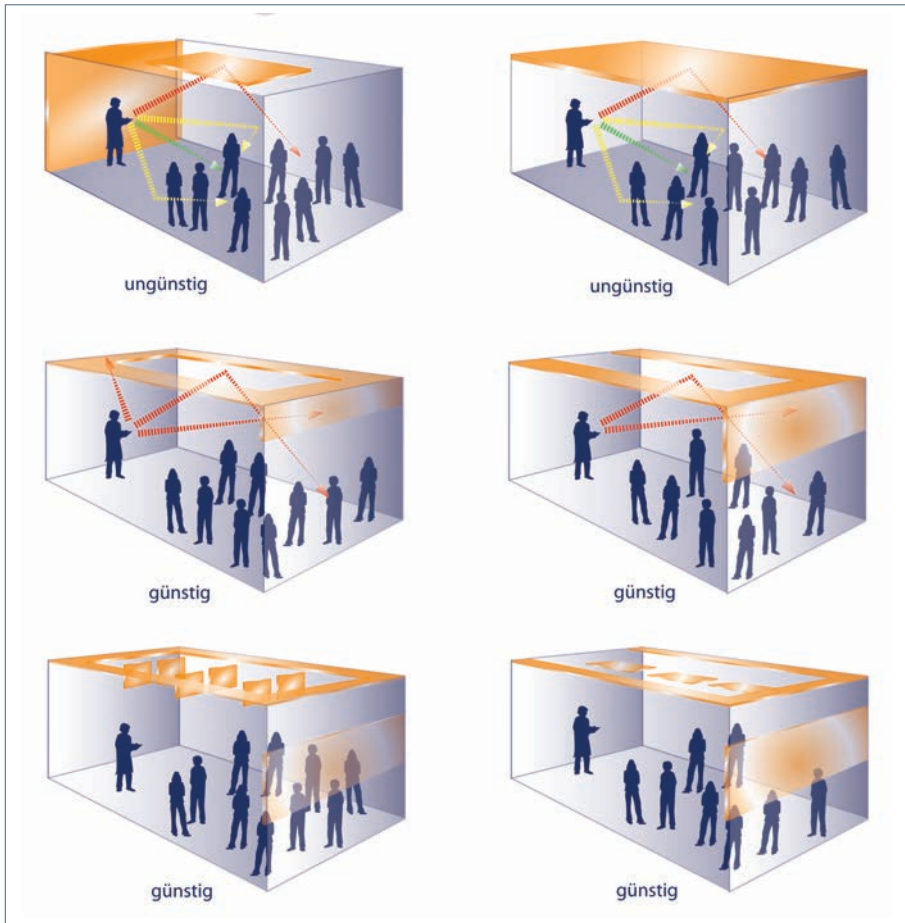


Abbildung 5.5 Günstige und ungünstige Verteilung von Schallabsorptionsflächen (orange markiert) an der Decke sowie der Rückwand in Anlehnung an die DIN 18041

Hinter einem Sprecher sollte keine schallabsorbierende Fläche vorhanden sein (oben links). Weiterhin ist eine alleinige Belegung der Decke mit absorbierend wirkenden Materialien nicht zu empfehlen. Zwischen parallel angeordneten, reflektierenden Flächen kann es dann zu einem deutlich wahrnehmbaren Flatterecho kommen. Ein Flatterecho ist eine Folge von einzelnen starken Reflexionen, die immer dann auftreten kann, wenn eine Raumrichtung deutlich weniger bedämpft wird als die anderen Raumrichtungen. Es kann passieren, dass durch die Erhöhung der Absorption in einer Raumrichtung, beispielsweise

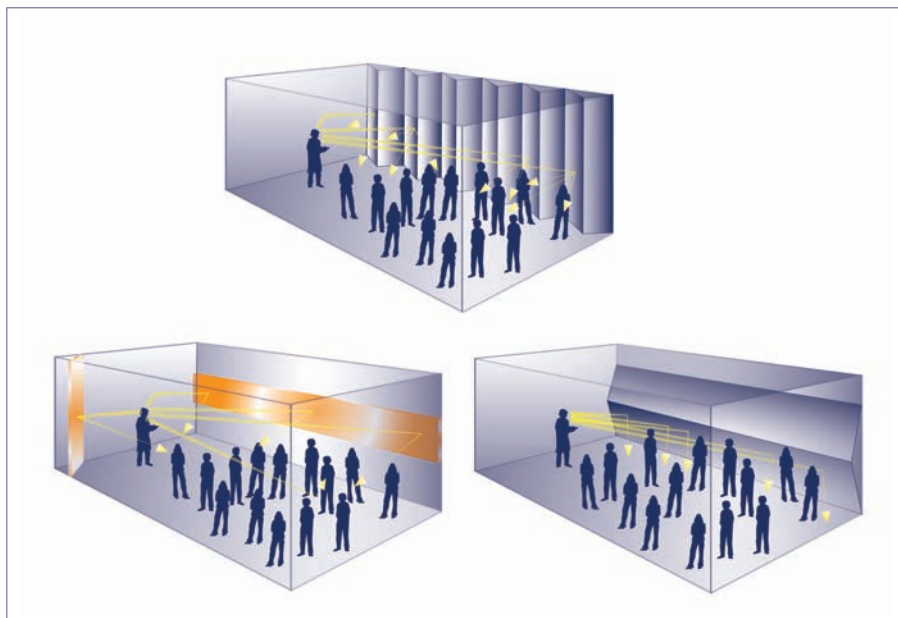


Abbildung 5.6 Vermeidung von Flatterechos durch teilweise Belegung mit Absorbern (links unten), Schrägstellung (rechts unten) oder Strukturierung (oben) wenigstens einer von zwei parallelen Wänden in Anlehnung an die DIN 18041

se beim Austausch einer Decke, ein Flatterecho hervortritt, das vorher bei längerem Nachhall im Raum nicht wahrnehmbar war.

Günstige Anordnungen von schallabsorbierenden Flächen oder auch senkrecht gehängten Baffles oder unter der Decke abgehängten Elementen (»Deckensegel«) sind in den unteren beiden Zeilen der Abbildung 5.5 dargestellt. Es sollte gerade bei Räumen der Nutzungsart »Unterricht« immer auch ein Teil der dem Sprecher gegenüberliegenden Wand mit Schallabsorbern belegt werden.

Zur Vermeidung von Flatterechos zwischen parallelen, reflektierenden Flächen kann entweder eine der beiden Flächen strukturiert, schräg gestellt oder mit Absorption ausgestattet werden. Drei Möglichkeiten zur Vermeidung von Flatterechos sind in Abbildung 5.6 skizziert. Durch eine Strukturierung einer Wand (oberer Teil der Abbildung) kommt es zu diffusen Reflexionen an der entsprechend behandelten Fläche. Die Strukturierung kann auch durch Einrichtungsgegenstände wie offene Regale, Vorsprünge, kleinteilige Glasrahmen

etc. erfolgen. Wichtig hierbei ist, dass die Strukturgröße in der Größenordnung der Wellenlänge für Sprache ist, siehe Abbildung 3.3. Eine Schrägstellung um erfahrungsgemäß mindestens 5° bewirkt ebenfalls eine Unterbrechung der Vielfach-Reflexionen zwischen parallelen Wänden (siehe Abbildung 5.6 rechts unten). Bei Aufbringung von Absorption auf eine der beiden parallelen Flächen genügt es in der Regel, dass ca. 30 % der Fläche mit einem Schallabsorber belegt werden, um das Flatterecho aufzubrechen (siehe Abbildung 5.6 links unten). Neben der Absorption bewirkt der Wechsel zwischen absorbierender und reflektierender Fläche dann zusätzlich eine diffuse Reflexion oder Streuung. Auch hier ist zu beachten, dass die Schallausbreitung im dreidimensionalen Raum erfolgt. Zu beachten ist, dass Flatterechos durchaus auch zwischen Decke und Boden auftreten können.

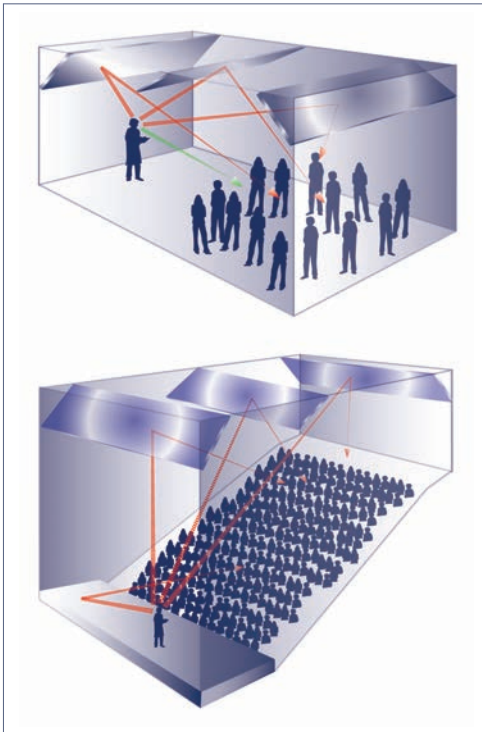


Abbildung 5.7 Lenkung des Schalls mit Hilfe nützlicher Reflexionen für einen kleinen Raum mit einer Ebene für die Zuhörer sowie für einen größeren Raum mit ansteigendem Gestühl in Anlehnung an die DIN 18041

Bei Räumen mit einer Abmessung von mehr als 9 m in wenigstens einer Raumrichtung kann es bei reflektierenden Flächen aufgrund der Laufzeit des Schalls zu zeitlich verzögerten und trotzdem starken, somit wahrnehmbaren Reflexionen kommen. Derartige Reflexionen führen in der Überlagerung mit dem Direktschall und den weiteren Reflexionen im Raum zu einer Minderung der Sprachverständlichkeit. Zur Vermeidung eines solchen Effekts ist es sinnvoll, die reflektierenden Flächen mit Schallabsorbern zu belegen oder aber schräg zu stellen, um den Schall gezielt in die weiter von der Schallquelle bzw. vom Sprecher entfernt liegenden Hörerbereiche zu lenken.

Die Schalllenkung mit reflektierenden Flächen ist der Absorption gerade in Räumen mit vielen Zuhörerplätzen vorzuziehen, da aufgrund der Personenzahl häufig schon ausreichend Absorption im Raum vorhanden ist. Zusätzliche Absorption ohne gezielte Schalllenkung kann dazu führen, dass der Schallpegel an weiter vom Sprecher entfernten Zuhörerplätzen nicht mehr ausreicht.

In größeren Vortrags- oder Aufführungsräumen mit fest definierter Sprecher- oder Bühnenposition ist es ratsam, die Fläche hinter dem Sprecher bzw. der Bühne schallreflektierend auszubilden, um so den Schall gezielt in den Raum zu lenken. Die DIN 18041 empfiehlt, diese Fläche als Schallabsorber für tiefe Frequenzen auszubilden und mit weiteren Elementen an Decke und Wänden zur Schalllenkung, sogenannten Reflektoren, zu kombinieren. In Abbildung 5.7 sind entsprechende Möglichkeiten der Schalllenkung skizziert. Bei der Ausrichtung und Positionierung der entsprechenden Reflektoren hilft die Vorstellung der geometrischen Akustik, dass sich Schall strahlenförmig ausbreitet. Um eine wirksame geometrische Reflexion, siehe Abschnitt 3.3, zu erhalten, sind entsprechend große Reflektoren zu verwenden.

Abschließende Anmerkungen zur DIN 18041 (2016)

Die DIN 18041 [52] stellt nach Ansicht vieler Akustiker und Sachverständiger die allgemein anerkannten Regeln der Technik für den Bereich der Raumakustik dar. Gerade mit der Neufassung im Jahr 2016 sind bewährte und erprobte Inhalte der Fassung aus dem Jahr 2004 [51] fortgeführt, damit bestätigt und neue Aspekte eingebracht werden.

Auch während der abgeschlossenen Überarbeitung der DIN 18041 wurde vereinzelt die Meinung geäußert, siehe beispielsweise [91], den normativ festge-

legten Frequenzbereich um jeweils eine Oktave am unteren und oberen Rand zu erweitern. Es existieren nach wie vor keine wissenschaftlich gesicherten Erkenntnisse, dass hierdurch eine wesentliche Verbesserung der Hörsamkeit von den in der Norm behandelten Räumen für Sprachdarbietungen erreicht wird. Insofern wurde im entsprechenden DIN-Gremium zur Überarbeitung der Norm eine Erweiterung des Frequenzumfangs einstimmig abgelehnt. Eine entsprechende Erweiterung würde zudem Auswirkungen auf die Messnormen, wie die Hallraum-Methode (Ziffer 3.5.2), mit sich bringen. Entsprechende Erweiterungen des Messbereichs, die in der Bauakustik seit geraumer Zeit zumindest angedacht werden, sind in der Raumakustik bislang nicht zu erkennen und auch nicht notwendig. Im Juni 2014 hat eine große Mehrheit der beteiligten Fachleute hierzu Stellung bezogen, siehe dazu die »Gemeinsame Stellungnahme des DIN-Arbeitskreises zur Überarbeitung der DIN 18041 und des Fachausschusses Bau- und Raumakustik der Deutschen Gesellschaft für Akustik zur Thematik tiefer Frequenzen in der Akustik kleiner bis mittelgroßer Räume« [60]. Aus dieser Stellungnahme vom Juni 2014:

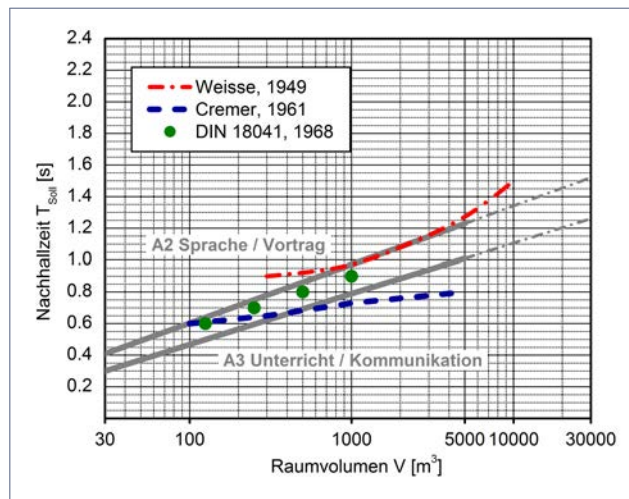
»Eine Erweiterung des bestehenden Frequenzbereichs der DIN 18041:2004-05 von 100 Hz bis 5 000 Hz in Terzbandbreite wird für die in der Norm behandelten Räume als nicht erforderlich erachtet. Recherchen und Befragungen des Arbeitskreises zur Überarbeitung der DIN 18041 sowie eine ausführliche Diskussion im Rahmen der Sitzung des Fachausschusses im September 2012 in Aachen (zur Vorbereitung der Überarbeitung der Norm) zur Bedeutung der tiefen Frequenzen im Hinblick auf die Sprachkommunikation ergaben keine belastbaren Ergebnisse, die eine entsprechende Erweiterung des normativ gefassten Frequenzbereichs der DIN 18041 rechtfertigen würden. Eine Erweiterung des normativ gefassten Frequenzbereichs ist auch vor dem Hintergrund der Normen zur Messung der Schallabsorption (DIN EN ISO 354) sowie der Messung raumakustischer Parameter (DIN EN ISO 3382-Serie) nicht sinnvoll.«

Ein allgemeiner und stets wiederkehrender Hinweis zur DIN 18041 bezieht sich auf den Begriff des »diffusen Schallfeldes«, der als eine Art allgemeine Grundlage der Betrachtung für viele in der DIN 18041 behandelten Räume an-

gesehen werden kann (siehe auch Ziffer 3.2, Seite 55). In der DIN 18041 wird zur Berechnung der Nachhallzeit auf DIN EN 12354-6 [61] verwiesen. Hier auf wird unter Ziffer 6.2 eingegangen. Anzumerken ist, dass die DIN 18041 als Norm zur Formulierung von Anforderungen und nicht als Berechnungsvorschrift zu interpretieren ist. Im Normtext wird darauf hingewiesen, dass für den Fall, dass die Voraussetzungen eines näherungsweise diffusen Schallfeldes nicht erfüllt sind, der Nachweis mit erweiterten Rechenmethoden (z. B. DIN EN 12354-6:2004-04 - Anhang D, Numerische Methoden wie Strahlverfolgung etc.) erfolgen kann.

Aktuell existiert keine Norm zu diesen numerischen Methoden zur Berechnung von Schallfeldern in der Raumakustik. Ein solches Regelwerk wäre nach den immensen Entwicklungen bei den raumakustischen Simulationsprogrammen sicherlich wünschenswert, um so eine Qualitätssicherung und Verlässlichkeit in diesem Bereich zu erreichen.

Abbildung 5.8 Empfehlungen für die Nachhallzeit bei mittleren Frequenzen von Cremer [31] und Weisse [200] im Vergleich zu den Werten der DIN 18041 [52] für die Nutzungsarten A2 »Sprache/Vortrag« und A3 »Unterricht/Kommunikation«



Abschließend sei nochmals betont, dass die Vorgaben der DIN 18041 als Zusammenfassung bewährten Erfahrungswissens anzusehen sind. Ein Rückblick auf die unter Ziffer 3.1 angeführte Literatur zeigt, dass die in der aktuellen Fassung der DIN 18041 [52] gegebenen Empfehlungen der Nutzungsarten A2 »Sprache/Vortrag« und A3 »Unterricht/Kommunikation« eine große Übereinstimmung mit quasi »historischen« Empfehlungen zeigen. Die Vorgaben der

DIN 18041 aus dem Jahr 1968 [50] sowie die Empfehlungen von Cremer [31] und Weisse [200] sind in Abbildung 5.8 im Vergleich zu den aktuellen Sollwerten der Nutzungsarten A2 und A3 dargestellt.

Neben dem absoluten Wert der Nachhallzeit bei mittleren Frequenzen wird sowohl von Cremer [31] als auch von Weisse [200] auf die notwendige Einhaltung des Frequenzverlaufs der Nachhallzeit zwischen 100 Hz und 4000 Hz hingewiesen. Schon Weisse [200] unterschied 1949 zwischen »Kanzelrede«, die einen längeren Nachhall erfordert, und »sachlichen Sprachvorträgen«, die die kürzesten Nachhallzeiten benötigen. Das folgende Zitat aus dem Buch von Weisse fasst einige interessante Aspekte zum Frequenzbereich und Frequenzverlauf der Nachhallzeit zusammen:

»Ein gerader Verlauf der Nachhallzeit für 128 bis 4096 Hz mag für Sonderzwecke wie Senderäume usw. Bedeutung besitzen, in wirklichen Gebrauchs- und Festräumen, historischen wie neuen, wurde er bisher nicht beobachtet.«

5.2.2 VDI 2569 »Schallschutz und akustische Gestaltung im Büro«

Die Richtlinie VDI 2569 »Schallschutz und akustische Gestaltung im Büro« [191] ist durch eine Neufassung [193] ersetzt worden. Im Februar 2016 war ein Entwurf zur Neufassung erschienen, kurz als E VDI 2569 [192] bezeichnet, der in einigen Details von der finalen Ausgabe des Jahres 2019 abweicht.

Ausgabe 1990 (zurückgezogen)

Schon im Vorwort der Richtlinie aus dem Jahr 1990 wird darauf hingewiesen, dass Lärm im Büro von vielen Befragten als einer der schwerwiegendsten Störfaktoren bewertet wird. Dieser Hinweis wird allerdings nicht weiter vertieft.

Neben ausführlichen Empfehlungen zum Schallschutz, also der Schalldämmung von Bauteilen, werden auch Hinweise zur Nachhallzeit und »Halligkeit« sowohl in Einzelbüros als auch in Mehrpersonenbüros aufgeführt. Für kleine Büroräume wird angeführt, dass aus Gründen der Sprachverständlichkeit und einer »akustischen Behaglichkeit« die »Halligkeit« gering sein sollte. Eine schallabsorbierende Decke wird als vorteilhaft für die akustische Behaglichkeit sowie für die Verständigung am Telefon beschrieben. Konkrete Angaben zur Nachhallzeit werden hingegen nicht gemacht.

Die Fassung der VDI 2569 aus dem Jahr 1990 beschreibt die Nachhallzeit als kein ausreichendes Kriterium für große Mehrpersonenbüros zur Beurteilung und Auslegung der akustischen Eigenschaften des Raums. Die »Halligkeit« sollte durch die Verwendung von schallabsorbierendem Material verringert werden. Eine explizite Vorgabe für die Nachhallzeit wird nicht gegeben. Stattdessen wird das Verhältnis von äquivalenter Absorptionsfläche A im Raum zum Raumvolumen V betrachtet. Es wird als geeigneter Wert der Richtwert von

$$A/V = 0,3 \text{ bis } 0,35 \text{ m}^{-1} \quad 5.7$$

beschrieben. Eine Aussage oder Vorgabe, auf welchen Frequenzbereich sich die äquivalente Absorptionsfläche A bezieht, fehlt.

Für die Planung von Räumen mit Anforderungen an Kommunikation oder auch »die Wahrnehmung von sprachlichen Mitteilungen« verweist die VDI 2569 [191] aus dem Jahr 1990 auf die damalige Fassung der DIN 18041 aus dem Jahr 1968, die mit der letzten Neufassung im Jahr 2016 fortgeschrieben wurde.

Ausgabe 2019

Im Folgenden wird die Neufassung der Richtlinie VDI 2569 des Jahres 2019 [193] vorgestellt und diskutiert. Sowohl für den Schallschutz (Bauakustik) als auch die akustische Gestaltung (Raumakustik) im Büro wurde die Richtlinie VDI 2569 grundlegend neu gefasst. Beim Schallschutz werden die maßgeblichen Kenngrößen, wie schon zuvor im Bereich des Wohnungsbaus mit der Richtlinie VDI 4100 [196], auf nachhallbezogene Kennwerte umgestellt. Zu begrüßen ist hierbei, dass damit sowohl im Wohnungsbau mit der VDI 4100 als auch im Bereich der Büros nun Vorgaben und Planungshinweise existieren, die sich bewusst von den überholten und rechtlich fragwürdigen Anforderungen der teilweise noch baurechtlich eingeführten DIN 4109:1989-11 [53]² absetzen.

- 2 Im Juli 2016 ist eine neue Fassung der DIN 4109, DIN 4109-1:2016-07 [54], veröffentlicht worden, die durch DIN 4109-1:2018-1 [55] bereits ersetzt wurde. Die flächendeckende baurechtliche Einführung ist nicht abgeschlossen (Stand 03/2019). Aktuell sind daher je nach Bundesland drei verschiedene Ausgaben der DIN 4109 zu verwenden. Beiblatt 2 zu DIN 4109 [56] wurde bislang nicht zurückgezogen, sodass die Empfehlungen zum Schallschutz im eigenen Bereich, z. B. zwischen den Büros in einer Firma, weiter bestehen.

Die mit der Neufassung der VDI 2569 angestrebte Neuausrichtung der Richtlinie geht davon aus, dass neben Lärm auch Sprache in Büros als größter Störfaktor von den Mitarbeitern benannt wird. Die Richtlinie zeigt eine Reihe von Maßnahmen zur Optimierung des kommunikativen Wohlempfindens in Büroräumen auf. Neben Maßnahmen zur Absorption sowie zur Schirmung wird auch die Idee der Maskierung durch das Einspielen von künstlichen Geräuschen einbezogen. Die Richtlinie wendet sich, anders als die DIN 18041, an sachkundige Fachplaner. Ein wichtiger Unterschied des Ansatzes der VDI 2569 im Vergleich zur DIN 18041, die generell auf das Erreichen einer möglichst guten Hörsamkeit in den verschiedenen Räumen abzielt, besteht darin, dass in der VDI 2569 Maßnahmen zur Minderung der Sprachverständlichkeit sowie zur Senkung von Störgeräuschen angeführt werden.

Mit der Neufassung der VDI 2569 werden die Grundlagen der Lärmwirkungen in Büros dargestellt. Die klassischen Ansätze der Lärminderung führen in Büros häufig nicht zur Lösung bestehender Probleme, die meist nicht durch zu hohe Lautstärken geprägt sind. Nicht direkte oder aurale Wirkungen sind Grund der Störungen im Büro, sondern vielmehr führen Geräusche mit niedrigen Pegeln zu extraauralen Belästigungsreaktionen mit verschiedensten Ausprägungen. Umfangreiche internationale Literaturzitate zeigen diesen Sachverhalt auf. Der Hinweis, dass lediglich 30% bis 40% der Belästigungen durch technisch-akustische Zusammenhänge aufgeklärt werden können, siehe Meis [139], findet sich nun in der Neufassung. Neben den Belästigungsreaktionen sind auch Beeinträchtigungen kognitiver Leistungen durch Geräuscheinwirkungen in Büros ausführlich beschrieben.

Wie auch in der Fassung der VDI 2569 [191] des Jahres 1990 werden Vorgaben für die Bau- und Raumakustik angeführt. Prinzipiell wird zwischen Einzelbüros und Mehrpersonenbüros unterschieden. Hinsichtlich des Schallschutzes werden ebenfalls vertrauliche Büros sowie Besprechungsräume einbezogen.

Die Festlegung der raumakustischen Empfehlungen erfolgt für Einzel- und Mehrpersonenbüros getrennt. Für beide der betrachteten Büroarten werden Kriterien für eine Klassifizierung in drei Klassen (kurz: A, B und C) definiert. Die Kriterien beruhen sowohl auf raumakustischen Kenngrößen als auch auf dem Störschalldruckpegel bauseitiger Geräusche. Im Folgenden werden die Grundlagen dieser Klassifizierung dargestellt.

Raum-akustik-klasse	Erwartungs-niveau	Beschreibung und Anmerkung aus planerischer Sicht
A	hoch	Eine hohe akustische Behaglichkeit in Einzelbüros wird von den Nutzern als angenehm und ruhig empfunden und ermöglicht eine sehr gute Sprachverständlichkeit innerhalb des Raums und beim Telefonieren. <i>Idealzustand, den sich der Planer wünscht und der Nutzer einfordern sollte</i>
B	mittel	Nur unter ungünstigen Umständen, wie z. B. beim Telefonieren unter Einwirkung eines erhöhten Störgeräusches oder anderer Gespräche, kann es zu einer ungenügenden Sprachverständlichkeit und damit zu einer hohen Höranstrengung kommen. Beanstandungen über unzureichende raumakustische Bedingungen kommen in der Regel selten vor. <i>mittlere Güte, die in der Regel ohne hohen baulichen Aufwand umgesetzt werden kann</i>
C	gering	Im Falle von Telefonaten und Besprechungen wird die Raumbedämpfung von den meisten Nutzern als zu gering empfunden. Störgeräusche mit dem A-bewerteten Störschalldruckpegel bauseitiger Geräusche gemäß Tabelle 5.6 können die Sprachverständlichkeit verringern. Beanstandungen der Nutzer über unzureichende raumakustische Bedingungen sind nicht auszuschließen. <i>Mindestmaß, das aus planerischer Sicht gerade noch vertretbar ist</i>

Tabelle 5.5 Erwartungen und Beschreibung der raumakustischen Bedingungen der Raumakustikklassen A, B und C im Einzelbüro

Einzelbüros

Im Einzelbüro wird die akustische Situation im Wesentlichen anhand der Bedämpfung des Raums, ausgedrückt durch die Nachhallzeit, sowie durch den bauseitigen Störgeräuschpegel bewertet. Als raumakustische Kenngrößen werden die maximale Nachhallzeit T_{\max} und der Störschalldruckpegel der bauseitigen Geräusche $L_{NA,Bau}$, siehe DIN 18041 [52] sowie Ziffer 3.2, verwendet.

Raumakustik- klasse	T _{max} in Oktavbändern		L _{NA,Bau}
	125 Hz	250 Hz bis 4 kHz	
A	≤ 0,8 s	≤ 0,6 s	≤ 30 dB
B	≤ 1,0 s	≤ 0,8 s	≤ 35 dB
C	≤ 1,2 s	≤ 1,0 s	≤ 40 dB

Tabelle 5.6 Empfehlungen für die raumakustischen Kenngrößen zur Zuordnung zu den Raumakustikklassen in Einzelbüros

Die Kenngröße T_{\max} wird in der VDI 2569 als Obergrenze der nachzuweisenden Nachhallzeit nach DIN EN ISO 3382-2 [70] definiert. Die Erwartungen der Nutzer an Räume, die den drei Klassen A, B und C entsprechen, können der Tabelle 5.5 entnommen werden. Die Zuordnung zu den Klassen A, B und C erfolgt mit Hilfe von T_{\max} und $L_{NA,Bau}$ nach den in der Tabelle 5.6 angegebenen Grenzen. Zur Zuordnung in eine der drei Klassen müssen beide Kenngrößen der jeweiligen Klasse eingehalten werden.

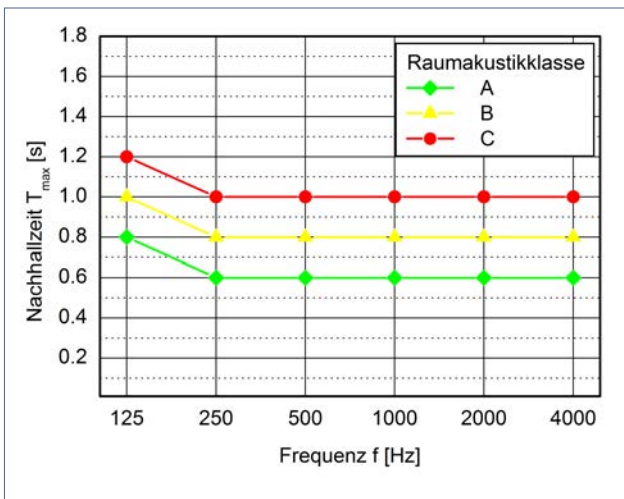


Abbildung 5.9 Empfehlung für die Nachhallzeit T_{\max} in Einzelbüros

In Abbildung 5.9 sind die Empfehlungen für die frequenzabhängige Nachhallzeit T_{\max} grafisch dargestellt. Die Berechnung zur Planung oder die Messung zum Nachweis der akustischen Qualität von Einzelbüros ist für die Oktaven von 125 Hz bis 4000 Hz durchzuführen. Die Diffusität des Schallfeldes im Raum ist bei der Planung zu beachten. Durch schallstreuende Elemente oder aber eine entsprechende Positionierung von schallabsorbierenden und -reflektierenden Einbauten ist eine angemessene Diffusität sicherzustellen.

Die Empfehlungen für Einzelbüros betreffen in der Regel Räume mit einem Volumen bis ca. 100 m^3 . Bei größeren Einzelbüros ist gegebenenfalls eine gesonderte Einzelbetrachtung erforderlich, insbesondere dann, wenn in dem Büro zusätzlich Besprechungszonen oder andere Nutzungen geplant sind. Hier sind unter Umständen zusätzlich die Hinweise und Empfehlungen der DIN 18401 zur Hörsamkeit von Besprechungsräumen anzuwenden.

Häufig wird im Hinblick auf Einzelbüros angenommen, dass in einem solchen Raum keine Störungen auftreten können, da ja letztlich nur eine Person anwesend ist, die sich bestenfalls selbst stören könnte. Dieses Argument ist vordergründig richtig. Jemand, der bei jedem Telefonat gegen den Raum ansprechen muss, ist allerdings schneller erschöpft und auf Dauer weniger effizient und produktiv. Es geht auch im Einzelbüro um die Frage der akustischen Behaglichkeit und Nutzbarkeit des Raums.

Mehrpersonenbüros

In der VDI 2569 [193] wird zwischen kleinen und großen Mehrpersonenbüros unterschieden. Diese Unterscheidung wurde erst im Rahmen der Behandlung der Einsprüche zu Entwurf E VDI 2569 [192] getroffen. Als Kriterium zur Abgrenzung zwischen kleinen und großen Mehrpersonenbüros dient der maximale Abstand zwischen allen vorhandenen Arbeitsplätzen. In kleinen Mehrpersonenbüros im Sinne von VDI 2569 ist der Abstand zwischen den am weitesten entfernten Arbeitsplätzen kleiner als 8 m. Entsprechend sind große Mehrpersonenbüros Räume mit mehr als 8 m zwischen den am weitesten entfernten Arbeitsplätzen. Die Unterscheidung zwischen kleinen und großen Mehrpersonenbüros erfolgt in der VDI 2569 nach dem zuvor beschriebenen Abstandskriterium und nicht nach der Anzahl der Arbeitsplätze oder der Größe der Grundfläche, wie dies im Bereich des Arbeitsschutzes durchgeführt wird.

Für kleine Mehrpersonenbüros wird die subjektive Wahrnehmung oder auch die akustische Behaglichkeit ähnlich wie im Einzelbüro durch die Nachhallzeit sowie den Störschalldruckpegel geprägt. Aufgrund der Kommunikationssituation mit mehreren Personen werden geringere Nachhallzeiten als im Einzelbüro empfohlen. In Tabelle 5.7 sind die Empfehlungen für die maximale Nachhallzeit und den maximalen Störschalldruckpegel angeführt. In Abbildung 5.10 sind die Empfehlungen an die frequenzabhängige Nachhallzeit T_{max} grafisch dargestellt.

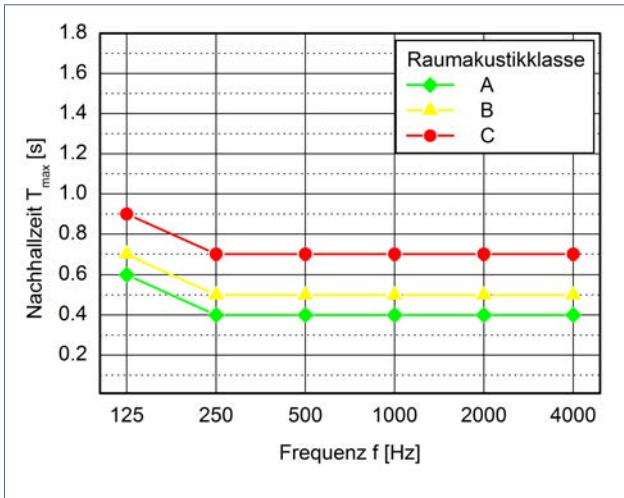


Abbildung 5.10 Empfehlung für die Nachhallzeit T_{\max} in kleinen Mehrpersonenbüros

Raumakustikklasse	T_{\max} in Oktavbändern		$L_{NA,Bau}$
	125 Hz	250 Hz bis 4 kHz	
A	$\leq 0,6$ s	$\leq 0,4$ s	≤ 35 dB
B	$\leq 0,7$ s	$\leq 0,5$ s	≤ 40 dB
C	$\leq 0,9$ s	$\leq 0,7$ s	≤ 40 dB

Die Werte der Nachhallzeit sollten nicht unter 0,2 s bis 0,3 s liegen.

Tabelle 5.7 Empfehlungen für die raumakustischen Kenngrößen zur Zuordnung zu den Raumakustikklassen in kleinen Mehrpersonenbüros

In großen Mehrpersonenbüros ist neben dem Schallpegel oder auch der Lautstärke ebenfalls der Aspekt der Sprachverständlichkeit und der räumlichen Schallpegelverteilung wichtig für die subjektive Wahrnehmung. Neben der Bedämpfung des Raums und dem Störschalldruckpegel werden die räumliche Abklingrate $D_{2,S}$ sowie der Sprachpegel in 4 m Abstand $L_{p,A,S,4m}$ nach DIN EN ISO 3382-3 [71] als raumakustische Kenngrößen zur Klassifizierung verwendet (siehe auch Seite 115). Die Aspekte der Schallausbreitung und -abschirmung werden durch diese beiden Parameter erfasst. Große Mehrpersonenbüros werden somit in der VDI 2569 anhand von vier Kenngrößen klassifiziert. Auf diese Weise können die besonderen Erfordernisse im Mehrpersonenbüro angemessen berücksichtigt werden [139]. Insgesamt werden, wie im Einzelbüro oder auch kleinen Mehrpersonenbüro, drei Raumakustikklassen A, B und C definiert.

Zur Kennzeichnung der Schallausbreitung werden durch die räumliche Abklingrate $D_{2,S}$ und durch den Sprachpegel in 4 m Abstand $L_{p,A,S,4m}$ insgesamt drei Stufen der Schallausbreitung definiert. Die Definition der Stufen der Schallausbreitung 1 bis 3 ist in Tabelle 5.8 angegeben. Um einen Messweg der entsprechenden Stufe der Schallausbreitung zuzuordnen, muss für beide Kenngrößen der jeweilige Wert erfüllt werden.

Tabelle 5.8 Empfehlungen zur Einstufung der Messwege in großen Mehrpersonnbüros

Stufe der Schallausbreitung	$D_{2,S}$	$L_{p,A,S,4m}$
1	$\geq 8 \text{ dB}$	$\leq 47 \text{ dB}$
2	$\geq 6 \text{ dB}$	$\leq 49 \text{ dB}$
3	$\geq 4 \text{ dB}$	$\leq 51 \text{ dB}$

Während in der DIN EN ISO 3382, Teil 3 lediglich zwischen geraden und gekrümmten Messwegen unterschieden wird, ist in der Praxis eine genauere Definition der Messwege notwendig, da sich durch die Auswahl der Messwege lediglich nach den Kriterien der DIN EN ISO 3382, Teil 3 die Bewertung eines Raums stark beeinflussen ließe. Allein aufgrund der Tatsache, dass in der DIN EN ISO 3382, Teil 3 keine Mindestanzahl von Messwegen festgelegt ist und es auch keinerlei Hinweise zur Auswahl der Messwege zwischen den Arbeitsplätzen im Mehrpersonnbüro gibt, können im Sinne der Bewertung günstige oder ungünstige Messwege ausgewählt werden.

In der VDI 2569 wird eine konkrete Vorgabe zur Wahl und Anzahl der Messwege angeführt. Für die Anzahl der zu verwendenden Messwege wird in Abhängigkeit von der Anzahl der Arbeitsplätze im Raum ein Richtwert vorgegeben. In Tabelle 5.9 sind die Richtwerte dargestellt.

Tabelle 5.9 Richtwerte für die Anzahl der festzulegenden Messwege in großen Mehrpersonnbüros

Anzahl N der Arbeitsplätze	Anzahl der Messwege
$N \leq 15$	3
$15 < N \leq 24$	$N/4$, möglichst jedoch 3 oder 6
$25 < N \leq 50$	$N/4$, möglichst jedoch 6 oder 9
$50 < N$	12

Je nach Raumform und Anordnung der Arbeitsplätze können sich Messwege unterschiedlicher Länge ergeben. Es sollten möglichst lange Messwege gewählt werden; die Anzahl der längeren Messwege sollte nach Hinweis in der VDI 2569 doppelt so hoch sein wie die der kürzeren Messwege. Nach DIN EN

Raumakustik-klasse	Empfehlungen für die raumakust. Kenngrößen nach Tabelle 5.8	T _{max} in Oktavbändern		L _{NA,Bau}
		125 Hz	250 Hz bis 4 kHz	
A	2/3 der Wege in Stufe 1, restliche Wege in Stufe 2	≤ 0,8 s	≤ 0,6 s	≤ 35 dB
B	2/3 der Wege in Stufe 2, restliche Wege mindestens in Stufe 3	≤ 0,9 s	≤ 0,7 s	≤ 40 dB
C	1/3 der Wege in Stufe 2, restliche Wege in Stufe 3	≤ 1,1 s	≤ 0,9 s	≤ 40 dB

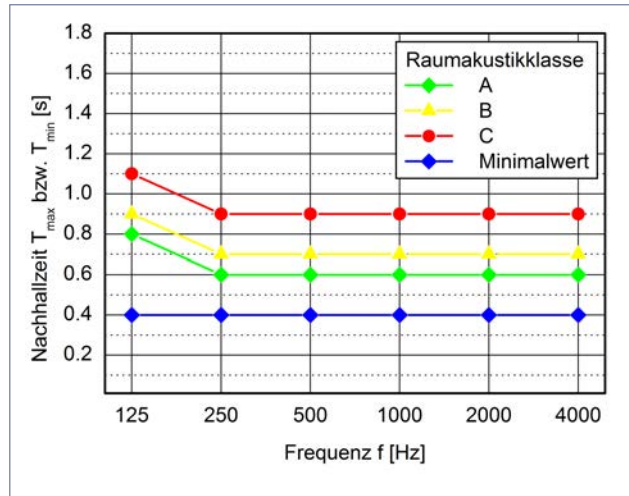
Tabelle 5.10 Empfehlungen für die raumakustischen Kenngrößen und den maximalen Störschalldruckpegel für die Raumakustikklassen A, B und C in großen Mehrpersonenbüros

ISO 3382, Teil 3 [71] sind die Messwege zwischen 2 m und 16 m lang und umfassen mindestens vier, besser sechs oder mehr Arbeitsplätze als Messpositionen. Bei stark zergliederten Anordnungen der Arbeitsplätze sollten möglichst unterschiedliche Orientierungen gewählt werden, wobei einzeln angeordnete Arbeitsplätze auch ausgeschlossen werden können. Bei Räumen mit Schallschirmen und ohne Schallschirme zwischen den Arbeitsplätzen sind Messwege mit und ohne Schirmung zu wählen. Bei den Messwegen über schallschirmende Elemente, wie Stellwände, Tischaufsätze, Schränke etc., hinweg muss mindestens ein Messpunkt von der Schallquelle aus gesehen vor dem Schirm liegen. Richtungsänderungen von Messposition zu Messposition auf einem Messweg von mehr als 30° sollten vermieden werden. Zur Bestimmung der Messpositionen innerhalb eines Messpfads empfiehlt es sich daher, zuerst die Sender- und die letzte Empfängerposition festzulegen. Weitere Hinweise zur Definition der Messwege sind der VDI 2569 zu entnehmen. In der Praxis ist es in vielen Büros schwierig, die geforderte Anzahl von Messwegen zu finden.

Die Klassifizierung eines großen Mehrpersonenbüros im Sinne der VDI 2569 ergibt sich anhand der Stufen der Schallausbreitung auf der vorgegebenen Anzahl an Messwegen, der maximalen Nachhallzeit und dem Störgeräuschpegel. Die Empfehlungen sind in Tabelle 5.10 dargestellt.

Für die Raumakustikklasse A in einem großen Mehrpersonenbüro müssen zwei Drittel der Messwege die Stufe 1, die übrigen Messwege die Stufe 2 erreichen und zugleich die Empfehlungen für die Nachhallzeit sowie den Störschall-

Abbildung 5.11 Empfehlungen für die Nachhallzeit der Raumakustikklassen A, B und C sowie die minimal zulässige Nachhallzeit in großen Mehrpersonenbüros



druckpegel eingehalten werden. Die Empfehlungen für die frequenzabhängige Nachhallzeit T_{\max} in großen Mehrpersonenbüros sind in Abbildung 5.11 dargestellt. Der Minimalwert von 0,4 s ist als Empfehlung zu verstehen. Für die Zuordnung zu den Raumakustikklassen wird er nicht herangezogen.

In Tabelle 5.11 sind Informationen zur Zuordnung der Klassen sowie der zu erwartenden Situation angeführt.

Weitere Anmerkungen

Auch wenn streng genommen viele Mehrpersonenbüros nicht nach den Näherungen der Sabinischen Nachhalltheorie als Räume mit einem diffusen Schallfeld betrachtet werden können, wird hier die Nachhallzeit als Kenngröße verwendet. Bei einer messtechnischen Erfassung sollte deshalb die Nachhallzeit in Zonen mit maximalen Abständen von 8 m zwischen Sender und Empfänger erfasst werden. Dies kann als eine lokale Nachhallzeit aufgefasst werden.

Es bleibt abzuwarten, inwieweit die in der VDI 2569 vorgeschlagene und in Fachkreisen nach wie vor diskutierte Klassifizierung Verbreitung und Anwendung in der Praxis finden wird. Gegenüber dem im Jahr 2009 erschienenen Entwurf zur DIN EN ISO 3382, Teil 3, der in einem Anhang ebenfalls einen Vorschlag zu Klassifizierung von Mehrpersonenbüros enthielt, stellt die VDI 2569

Raumakustikklasse	Planerischer und baulicher Aufwand	Beschreibung und Anmerkung aus planerischer Sicht	Empfehlungen in Abhängigkeit von der Nutzung
A	hoch	Die Raumakustikklasse A erfordert sehr umfangreiche und hoch wirksame raumakustische Maßnahmen zur Raumbedämpfung und Minderung der Schallausbreitung. Eine über die Raumakustikklasse A hinausgehende Verbesserung der raumakustischen Bedingungen ist unter Beibehaltung einer offenen Bürostruktur nicht möglich. <i>Idealzustand, den sich der Planer wünscht und der Nutzer einfordern sollte</i>	gut geeignet für Callcenter und Räume mit kommunikationsintensiven Nutzungen
B	mittel	Die Raumakustikklasse B erfordert umfangreiche und wirksame raumakustische Maßnahmen zur Raumbedämpfung und zur Minderung der Schallausbreitung. <i>mittlere Güte, die in der Regel ohne hohen baulichen Aufwand umgesetzt werden kann</i>	gut geeignet für Räume für Vertrieb, Konstruktion, Verwaltung geeignet für Callcenter
C	gering	Die Raumakustikklasse C erfordert wirksame raumakustische Maßnahmen zur Raumbedämpfung und zur Minderung der Schallausbreitung. <i>Mindestmaß, das aus planerischer Sicht gerade noch vertretbar ist</i>	geeignet für Räume für Vertrieb, Konstruktion, Verwaltung

Tabelle 5.11 Beschreibung des planerischen und baulichen Aufwandes in Mehrpersonenbüros in Abhängigkeit von der Klassifizierung

eine deutliche Klarstellung der Anforderungen und praxisbezogene Verbesserung der damaligen Klassifizierung dar. Mit der VDI 2569 werden Empfehlungen für die Kenngrößen der DIN EN ISO 3382, Teil 3, formuliert und dadurch bestehende Regelungslücken geschlossen.

Eine weitere Kenngröße in der DIN EN ISO 3382, Teil 3 ist der Ablenkungsabstand r_D . Da bei der Ermittlung von r_D jeweils der Fremdgeräuschpegel am Arbeitsplatz zu berücksichtigen ist und dieser Pegel nicht allein aus der Beschaffenheit des Gebäudes, sondern auch durch die im Raum vorhandene Büroausstattung (technische Geräte) sowie durch Verkehrsgeräusche in der Umgebung definiert wird, erschien der Kommission zur Neufassung der VDI 2569 diese Kenngröße derzeit nicht als praxistauglich. Je nach Betrieb und zugehörigen Geräuschen im Büro würde sich der Wert von r_D verändern. Bei Messungen von r_D wird häufig nicht der Fremdgeräuschpegel, sondern der Störschalldruckpegel der bauseitigen Geräusche $L_{NA,Bau}$ verwendet. Damit wäre dann eine Vergleichbarkeit verschiedener Räume wiederum gegeben.

Bei der Planung von Mehrpersonenbüros muss zunächst eine ausreichende Dämpfung der Räume nachgewiesen werden. Erst anschließend ist es sinnvoll und dringend notwendig, auch die Schallausbreitung unter Berücksichtigung von Schirmung, Anordnung der Plätze sowie Raumgeometrie im Detail zu betrachten. Da insbesondere die Berechnung von frequenzabhängiger Schirmung bzw. Beugung anhand von 3D-Modellen aktuell sehr stark in der Entwicklung begriffen ist, sollte die finale Klassifizierung eines Büroraums momentan noch durch Messungen erfolgen.

Prinzipiell soll mit dem Klassifizierungsvorschlag in der Neufassung der VDI 2569 eine Möglichkeit geschaffen werden, die akustischen Bedingungen in einem Büroraum eindeutig und nachvollziehbar zu definieren.

5.3 Vorgaben aus dem Bereich Arbeitsschutz

Wie zu Beginn dieses Kapitels dargestellt, ist die DIN 18041 (2016) [52] als Stand der Technik im Bereich der Raumakustik anzusehen. Dieses Regelwerk wurde im Konsens der beteiligten Kreise nach den allseits anerkannten Regularien des DIN erarbeitet und deckt eine Vielzahl von Räumen ab, die auch als Arbeitsstätten genutzt werden. Schon im Vorwort der DIN 18041 [52] wird darauf hingewiesen, dass bei der Anwendung zu berücksichtigen sei, dass in Deutschland für das Einrichten und Betreiben von Arbeitsstätten gesetzliche Regelungen bestehen. Angeführt werden das Arbeitsschutzgesetz [9], die Arbeitsstättenverordnung (ArbStättV) [10] sowie die sich darauf stützenden Arbeitsstättenregeln, die konkrete Vorgaben enthalten. Diese Anmerkungen wurden nach Hinweis des Bundesministeriums für Arbeit und Soziales, kurz BMAS, im Rahmen der Einspruchsverhandlung zur Neufassung der DIN 18041 aufgenommen. Die Technischen Regeln für Arbeitsstätten (ASR) konkretisieren die Anforderungen der Arbeitsstättenverordnung.

Die Technischen Regeln für Arbeitsstätten werden vom Ausschuss für Arbeitsstätten, kurz ASTA, betreut und entwickelt. Die Geschäftsführung des ASTA obliegt der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin. Zu den Aufgaben des ASTA gehört es,

- dem Stand der Technik, Arbeitsmedizin und Hygiene entsprechende Regeln und sonstige gesicherte wissenschaftliche Erkenntnisse für die Sicherheit und Gesundheit der Beschäftigten in Arbeitsstätten zu ermitteln,
- Regeln und Erkenntnisse zu ermitteln, wie die Anforderungen dieser Verordnung erfüllt werden können, sowie Empfehlungen für weitere Maßnahmen zur Gewährleistung der Sicherheit und zum Schutz der Gesundheit der Beschäftigten auszuarbeiten und
- das Bundesministerium für Arbeit und Soziales in allen Fragen der Sicherheit und der Gesundheit der Beschäftigten in Arbeitsstätten zu beraten.

Bei Einhaltung der Technischen Regeln kann ein Arbeitgeber davon ausgehen, dass die entsprechenden Anforderungen der Arbeitsstättenverordnung erfüllt sind.

§3a der ArbStättV zum Einrichten und Betreiben von Arbeitsstätten zielt darauf ab, diese in einer Art und Weise einzurichten und zu betreiben, dass Gefährdungen für die Sicherheit und Gesundheit der Beschäftigten möglichst vermieden oder minimiert werden. Im Anhang A der ArbStättV ist unter Punkt 3.7 das Gebot zur Lärminderung angeführt. Dort heißt es:

»In Arbeitsstätten ist der Schalldruckpegel so niedrig zu halten, wie es nach der Art des Betriebes möglich ist. Der Schalldruckpegel am Arbeitsplatz in Arbeitsräumen ist in Abhängigkeit von der Nutzung und den zu verrichtenden Tätigkeiten so weit zu reduzieren, dass keine Beeinträchtigungen der Gesundheit der Beschäftigten entstehen.«

Mit der Bekanntgabe der Technischen Regel ASR A3.7 »Lärm« im Mai 2018 [179] sind im Bereich des Arbeitsschutzes konkrete Vorgaben zur Raumakustik von Arbeitsstätten im extraauralen Pegelbereich beschrieben worden. Ab einem Dauerschallpegel von mehr als 80 dB ist die Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung [121] mit den konkretisierenden Technischen Regeln, kurz TRLV Lärm [183, 184, 185, 186], zu verwenden. Die ASR A3.7 wie auch die TRLV Lärm konkretisieren die Anforderungen der Arbeitsstättenverordnung für extraaurale und aurale Lärmbelastungen.

5.3.1 ASR A3.7 »Lärm«

Die ASR A3.7 gilt für das Einrichten und Betreiben von Arbeitsstätten und Arbeitsplätzen in Arbeitsräumen. Sie stellt keine Vorgaben für Pausen- und Bereitschaftsräume oder Baustellen auf. Unter Ziffer 3 werden eine Reihe von Begriffen angeführt, die nahezu identisch mit den entsprechenden normativen Definitionen aus DIN 1320 [43] oder DIN 45645-2 [58] sind. Konkrete Quellen und Verweise werden nicht angegeben. Es besteht weitgehend Übereinstimmung mit den entsprechenden Begriffen im Normenwerk.

Unter Ziffer 3.16 der ASR 3.7 werden drei Tätigkeitskategorien definiert. Diese werden anders als die entsprechenden Tätigkeitskategorien der Richtlinie VDI 2058, Blatt 3 [189] mit I bis III bezeichnet. Die folgenden Begriffsdefinitionen und Beispiele sind der ASR A3.7 [sic!] entnommen:

Tätigkeitskategorie I

hohe Konzentration oder hohe Sprachverständlichkeit

Tätigkeiten, die eine andauernd hohe Konzentration erfordern, weil für die Erbringung der Arbeitsleistung z. B. schöpferisches Denken, eine kreative Entfaltung von Gedankenabläufen, exaktes sprachliches Formulieren, das Verstehen von komplexen Texten mit komplizierten Satzkonstruktionen, eine starke Zuwendung zu einem Arbeitsgegenstand oder -ablauf verbunden mit hohem Entscheidungsdruck, das Treffen von Entscheidungen mit großer Tragweite oder eine hohe Sprachverständlichkeit kennzeichnend sind.

(Beispiele für Tätigkeiten und Handlungen – allgemein überwiegend geistige Tätigkeiten, die eine hohe Konzentration verlangen: Besprechungen und Verhandlungen in Konferenzräumen; Arbeiten in Bibliothekslesesälen; Wissensvermittlung durch Vorlesung oder Seminare sowie Prüfungen im akademischen oder schulischen Bereich; wissenschaftliches und kreatives Arbeiten; Entwickeln von Software; Treffen von Entscheidungen mit hoher Tragweite gegebenenfalls unter Zeitdruck; ärztliche Untersuchungen, Behandlungen und Operationen; Entwerfen, Übersetzen, Diktieren, Aufnehmen und Korrigieren von schwierigen Texten, Optimieren von Software und Prozessschritten komplexer Transferstraßen, Teachern von Robotern in verketteten Roboter-Linien)

Tätigkeitskategorie II

mittlere Konzentration oder mittlere Sprachverständlichkeit

Tätigkeiten, die eine mittlere bzw. nicht andauernd hohe Konzentration oder gutes Verstehen gesprochener Sprache bedingen, weil für die Erbringung der Arbeitsleistung z. B. üblicherweise Routineanteile, das heißt wiederkehrende ähnliche und leicht zu bearbeitende Aufgaben, das Treffen von Entscheidungen geringerer Tragweite (in der Regel ohne Zeitdruck) oder eine für Kommunikationszwecke erforderliche Sprachverständlichkeit kennzeichnend sind.

(Beispiele für Tätigkeiten und Handlungen – allgemeine Bürotätigkeiten und vergleichbare Tätigkeiten in der Produktion und Überwachung: informations- und kommunikationsgeprägte Tätigkeiten, wie Disponieren; Daten erfassen; Texte verarbeiten; Sachbearbeitung im Büro; psychomotorisch geprägte (feinmotorische) Tätigkeiten (Auge-Hand-Koordination); Arbeiten in Betriebsbüros und Laboratorien; Bedienen von Beobachtungs-, Steuerungs- und Überwachungsanlagen in geschlossenen Messwarten und Prozessleitwarten; Verkaufen, Bedienen von Kunden; Tätigkeiten mit Publikumsverkehr.)

Tätigkeitskategorie III

geringe Konzentration oder geringe Sprachverständlichkeit

Tätigkeiten, die eine geringere Konzentration infolge überwiegend vorgegebener Arbeitsabläufe mit hohen Routineanteilen erfordern sowie geringere Anforderungen an die Sprachverständlichkeit stellen.

(Beispiele für Tätigkeiten und Handlungen – allgemein industrielle und gewerbliche Tätigkeiten: einfache Montagearbeiten; handwerkliche Tätigkeiten (Fertigung, Installation); Tätigkeiten an Fertigungsmaschinen, Vorrichtungen, Geräten; Warten, Instandsetzen und Reinigen technischer Einrichtungen und deren unmittelbare Beaufsichtigung; Bedienen von Bearbeitungsmaschinen für Metall, Holz und dergleichen; Reinigungsarbeiten; Lagerarbeiten; Einräumen von Ware)

Diese Beschreibungen der drei Tätigkeitskategorien entsprechen sinngemäß denen in der Richtlinie VDI 2058, Blatt 3 [189] (siehe auch Kapitel 2.4).

Im **Abschnitt 4** der ASR A3.7 werden extraaurale und reversible aurale Lärmwirkungen beschrieben. Es wird ausgeführt, dass die Arbeitsleistung durch extraaurale und reversible aurale Wirkungen von Lärm beeinträchtigt werden kann. Ausführlich wird dieser Aspekt der Lärmwirkungen im Anhang 1 der ASR dargestellt. Erwähnt wird, dass Fehlentscheidungen oder Fehlleistungen durch die Wirkung von Lärm zu einer Gefährdung der Beschäftigten oder auch anderer Personen führen können. Herabgesetzte Konzentration und Aufmerksamkeit, beeinträchtigte Sprachkommunikation, erhöhte Fehlerquote, verringerte Reaktionsleistung, erhöhte Risikobereitschaft oder auch verminderte Sicherheit bei manuellen Tätigkeiten sind beispielhaft genannte Gefährdungsursachen.

Abschnitt 5 der ASR A3.7 ist in zwei Teile unterteilt. Unter Ziffer 5.1 »Maximal zulässige Beurteilungspegel« werden maximale Werte des Beurteilungspegels je nach Tätigkeitskategorie vorgegeben (siehe Tabelle 5.12).

Tabelle 5.12 Tätigkeitskategorie und maximal zulässige Beurteilungspegel

Tätigkeitskategorie	Vorgabe Beurteilungspegel
I	darf einen Wert von 55 dB nicht überschreiten
II	darf einen Wert von ≤ 70 dB nicht überschreiten
III	soweit wie möglich reduzieren

Unter Ziffer 5.2 der ASR 3.7 »Raumakustische Anforderungen an Arbeitsräume« wird zwischen Büroräumen, Räumen in Bildungsstätten und sonstigen Räumen mit Sprachkommunikation unterschieden. Bei den Büroräumen wie auch den Räumen in Bildungsstätten wird eine Anforderung für den Hintergrundgeräuschpegel und die Nachhallzeit angegeben.

Büroräume

Für Büroräume werden Werte für die Nachhallzeit im unbesetzten Raumzustand angegeben, die in den Oktaven von 250 Hz bis 2000 Hz nicht überschritten werden sollen. Diese sind:

- Callcenter (Büro für kommunikationsbasierte Dienstleistungen): $T = 0,5$ s
- Mehrpersonen- und Großraumbüros: $T = 0,6$ s
- Ein- und Zweipersonenbüros: $T = 0,8$ s.

Die Werte sind in Abbildung 5.12 grafisch dargestellt. Im Vergleich zu den Empfehlungen der VDI 2569 fällt auf, dass eine Differenzierung nach verschiedenen Nutzungen nicht erfolgt und ein kleinerer Frequenzbereich verwendet wird. Andererseits gehen die Anforderungen für Callcenter noch über die Empfehlungen der VDI 2569, dort Raumakustikklasse A, hinaus.

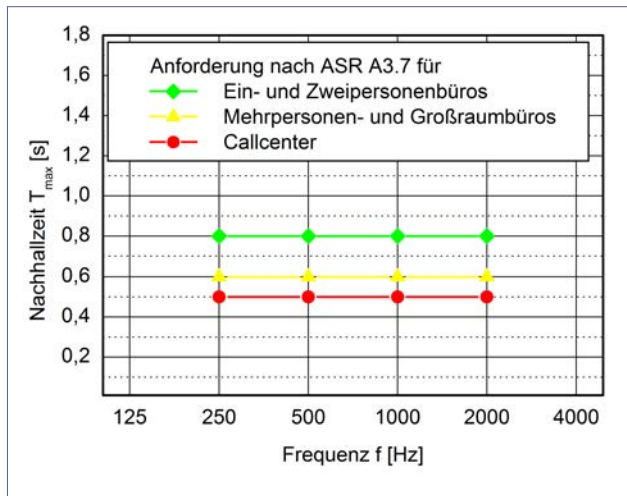


Abbildung 5.12 Anforderung für die Nachhallzeit in Büros nach ASR A3.7

Die maximale Nachhallzeit für Callcenter liegt bei einem Wert von $T = 0,5$ s. Eine untere Begrenzung ist nicht vorgegeben. Durch die Begrenzung auf die vier Oktaven von 250 Hz bis 2 000 Hz kann es zu einem sehr starken Anstieg der Nachhallzeit bei 125 Hz kommen. Ein solcher ASR-konformer Raum wäre dann aber kaum nutzbar.

Eine Vorgabe zu den weiteren Parametern nach DIN EN ISO 3382, Teil 3, [71] für Großraumbüros ist in der ASR A3.7 nicht enthalten. Diese Beschränkung der ASR allein auf die Nachhallzeit ist umso erstaunlicher, als seit geraumer Zeit bekannt ist, dass die Nachhallzeit gerade für Mehrpersonenbüros nicht die entscheidende Kenngröße ist. Unter Ziffer 5.1. (4) der ASR wird beschrieben: *»Für Tätigkeiten, bei denen überwiegend sprachabhängige kognitive Aufgabenstellungen zu lösen sind, sollen Arbeitsplätze ohne Belastung durch Hintergrundsprache zur Verfügung gestellt werden.«* Diese Belastung durch Hintergrundsprache wird allerdings nicht durch entsprechende Parameter thematisiert, wie sie DIN EN ISO 3382, Teil 3 [71] seit 2012 definiert hat. Die Nichtbeachtung der Erkenntnisse der Lärmwirkungsforschung (siehe als Übersicht [139]) in der ASR ist umso bemerkenswerter, da noch folgender Hinweis angeführt wird: *»In der Regel besteht in Büroräumen der Bedarf einer guten Sprachverständlichkeit über geringe Entfernungen, bei der andere, nicht beteiligte Personen nicht gestört werden.«*

Hinsichtlich des Lärmminderungsgebots wird in der ASR ebenfalls unter Ziffer 5.1. (4) beschrieben: *»Das Einspielen von Hintergrundsprachen als Maskierer für die Hintergrundsprache soll vermieden werden.«* Dies ist eine eindeutige Aussage gegen den Einsatz von Maskierungssystemen.

Räume in Bildungsstätten

Für Räume in Bildungsstätten wird die Formel 5.3, entsprechend der Nutzungsart A3 der DIN 18041 [52], angeführt. Die Nachhallzeit T_{Soll} soll im Frequenzbereich von 250 Hz bis 2 000 Hz die je nach Volumen V aus dieser Formel errechneten Werte im besetzten Zustand nicht überschreiten. Weiterhin ist in den genannten vier Oktavbändern jeweils eine Toleranz zulässig. In Abbildung 5.13 ist dieser Toleranzbereich dargestellt.

Diese Vorgabe der ASR A3.7 stellt eine Abschwächung gegenüber den Anforderungen der DIN 18041 [52] dar, da ein um zwei Oktaven verkleinerter

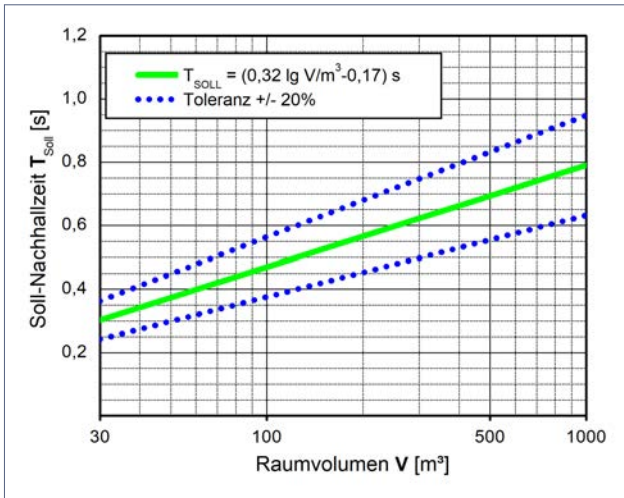


Abbildung 5.13 Anforderung für die Nachhallzeit in Bildungsstätten nach ASR A3.7

Frequenzbereich vorgegeben wird. Eine Planung nach Nutzungsart A3 der DIN 18041 führt somit zur Einhaltung der Anforderungen der ASR A3.7. Die Belange der Inklusion und des Barrierefreien Bauens werden in der ASR nicht thematisiert. Generell werden im Bereich des Arbeitsschutzes die Belange der barrierefreien Gestaltung in einer eigenen technischen Regel (ASR V3a.2 »Barrierefreie Gestaltung von Arbeitsstätten« [182]) zusammengefasst. In einem Hinweis wird in der ASR A3.7 angeführt: »Gemäß Bundesgleichstellungsgesetz und vergleichbarer Landesregelungen sind öffentlich zugängliche Neubauten inklusiv zu errichten. Bei erhöhten Anforderungen an die Sprachverständlichkeit, z. B. bei Personen mit Hörminderung oder Fremdsprachenunterricht, kann es erforderlich sein, die Nachhallzeit weiter zu verringern.«

Sonstige Räume mit Sprachkommunikation

Zu diesen Räumen heißt es in der ASR: Alle sonstigen Arbeitsräume, in denen Sprachkommunikation erforderlich ist und die nicht als Büros oder Bildungsstätten einzuordnen sind, »sollen durch raumakustische Maßnahmen so gestaltet werden, dass ein mittlerer Schallabsorptionsgrad $\bar{\alpha} = 0,3$ beim eingerichteten Raum erreicht wird.« Somit wird auch hier eine Kenngröße der Schallabsorption (siehe Abschnitt 3.6.5) zur Regulierung der Raumakustik verwendet.

Weiterhin soll der flächengemittelte Schallabsorptionsgrad $\bar{\alpha}$ als Mittelwert der vier Oktaven von 250 Hz bis 2000 Hz verwendet werden. In Räumen mit einem Volumen von mehr als 1 000 m³ kann alternativ eine mittlere Schall-druckpegelabnahme betrachtet werden. Diese Pegelabnahme wird als ausreichend angesehen, wenn sie in einem Abstand von 0,75 m bis 6 m mindestens 4 dB beträgt. Die Pegelabnahme ist als Mittelwert der Oktavbänder von 500 Hz bis 4 000 Hz zu betrachten.

Unter **Ziffer 6** der ASR A3.7 »Beurteilung von Gefährdungen durch Lärm beim Einrichten von Arbeitsstätten« wird auf verschiedene bereits bei der Planung zu beachtende Punkte hingewiesen. Neben den bauakustischen und raumakustischen Maßnahmen wird auch auf die Anforderungen an die Grundfläche nach ASR A1.2 »Raumabmessungen und Bewegungsflächen« [180] hingewiesen. Zu beachten sind ferner die Art der Arbeitsaufgabe, die Arbeitsorganisation, die Anforderungen an die Arbeitsmittel und auch die Belüftung der Arbeitsräume.

Hingewiesen wird ebenfalls auf den Einfluss von Hintergrundgeräuschen, die die Einhaltung des jeweiligen Beurteilungspegels erleichtern. Als Kenngröße wird der A-bewertete äquivalente Dauerschallpegel L_{pAeq} verwendet (siehe auch Kapitel 2.4). Die empfohlenen Höchstwerte für Hintergrundgeräusche sind in Tabelle 5.13 angegeben.

Raumart	empfohlene Höchstwerte L_{pAeq}
Konferenzraum, Klassenraum, Schulungsraum, Gruppenraum, Kindertagesstätte, Hörsaal, Seminarraum	35*
Zweipersonenbüros	40*
Großraumbüros	45*
industrielle Laboratorien	35* / 52**
Kontroll-/Steuerräume in der Industrie	35* / 55**
industrielle Arbeitsstätten	65** / 70***

Tabelle 5.13 Empfohlene Höchstwerte durch Hintergrundgeräusche

* für maximalen Beurteilungspegel von 55 dB

** für maximalen Beurteilungspegel von 70 dB

*** kein Beurteilungspegel

Die **Ziffer 7** der ASR A3.7 »Beurteilung von Gefährdungen durch Lärm beim Betreiben von Arbeitsstätten« zeigt ausführlich die Verfahren zur Ermittlung der raumakustischen Kennwerte wie auch der Lärmpegel auf. Es werden sowohl überschlägige als auch weitergehende messtechnische Vorgehensweisen beschrieben. Die unter Ziffer 7.1 der ASR A3.7 beschriebene »lärmbezogene Arbeitsplatzbegehung« als vereinfachtes Verfahren ist als nicht zeitgemäß zu bewerten. Hiervon ist abzuraten, da der Aufwand im Vergleich mit einer Berechnung (Ziffer 7.2) oder auch Messung (Ziffer 7.3.) der raumakustischen Kennwerte ungleich höher ist und das Ergebnis einer subjektiven Begehung mehr als fragwürdig erscheint. Immer dann, wenn die vorgegebenen Anforderungen an die raumakustischen Kennwerte oder den Beurteilungspegel nicht eingehalten werden, sind Maßnahmen vorzusehen und umzusetzen. Bei den messtechnischen Verfahren wird auf die einschlägigen Normen zur Messung der Nachhallzeit wie DIN EN ISO 3382-2 [70] oder zur Messung des Beurteilungspegels wie DIN 45645-2 [58] verwiesen. Somit kann auch hier festgestellt werden, dass bei einer normgerechten Vorgehensweise auch die Vorgaben der ASR A3.7 zur Beurteilung von Gefährdungen durch Lärm erfüllt werden.

Die **Ziffer 8** der ASR A3.7 »Maßnahmen zum Lärmschutz« beschreibt Schutzmaßnahmen. Hierbei wird auf den allgemeinen Ansatz im Bereich des Arbeitsschutzes verwiesen, dass technische Maßnahmen vor organisatorischen und persönlichen stehen. Diese ebenfalls schon in der Technischen Regel ASR V3 »Gefährdungsbeurteilung« [181] vorgegebene Maßnahmenhierarchie ist somit auch im Bereich der Gefährdungen durch Lärm anzuwenden. Maßnahmen sind bereits bei der Planung zu berücksichtigen und auf den Arbeitsplatz sowie die Tätigkeit abzustimmen.

Die technischen Maßnahmen werden nach primären Schutzmaßnahmen an der Quelle und sekundären Schutzmaßnahmen, wie den raumakustischen Maßnahmen, getrennt und umfangreich beschrieben. Im Hinblick auf die Raumakustik von Alltagsräumen ist anzumerken, dass Stellwände, Abschirmungen und Möbel wie auch Dekorationen, Warenregale auf Verkaufsflächen des Einzelhandels, Raumtextilien und Bodenbeläge als raumakustische Maßnahmen explizit genannt werden. Organisatorische wie auch verhaltenspräventive und persönliche Maßnahmen werden abschließend aufgeführt.

Ausgewählte Literaturhinweise wie auch zwei Anhänge zu »Extra-auralen und reversibel auralen Lärmwirkungen« und zur »Abschätzung der raumakustischen Kennwerte« runden die ASR A3.7 ab. Die Tabelle 1 in Anhang 2 der ASR A3.7 mit Angaben zum arithmetischen Mittelwert des Schallabsorptionsgrads für die Oktavbänder von 250 Hz bis 2000 Hz stellt hierbei einen Auszug aus Kapitel 8.1 dar. Der dort jeweils angeführte NRC-Wert entspricht dem für die ASR A3.7 benötigten Mittelwert bei einer Abschätzung der raumakustischen Kennwerte.

Abschließend ist darauf hinzuweisen, dass die ASR A3.7 erstmals für den extra-auralen Pegelbereich raumakustische Anforderungen formuliert. Diese sind aus raumakustischer Sicht geeignet, um in Arbeitsstätten und an Arbeitsplätzen in Arbeitsräumen Gefährdungen und Beeinträchtigungen durch Lärm zu verringern. In einigen Fällen, wie Callcentern, sind die Anforderungen der ASR A3.7 als Mindestanforderung aufzufassen, da gerade in Fällen, wo Sprache sowohl Nutz- aber auch Störsignal sein kann, es weitere raumakustische Kenngrößen zu beachten gilt.

5.3.2 »TRLV Lärm 3« und weitere Vorgaben

Ansonsten bestehen im Bereich des Arbeitsschutzes keine direkten Vorgaben für die raumakustischen Kenngrößen wie die Nachhallzeit oder andere Parameter. Die schon bei der ASR A3.7 verwendete Betrachtung der Raumakustik führt zu einer Vorgabe für den Mittelwert des flächen- und frequenzgemittelten Schallabsorptionsgrads $\bar{\alpha}$. Dieser sollte nach den Technischen Regeln zur Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung Teil 3: Lärmschutzmaßnahmen (kurz: TRLV Lärm 3) [186] mindestens einen Wert von 0,3 erreichen. Der Stand der Technik kann im Sinne der TRLV Lärm 3 dann als eingehalten angesehen werden.

Hierbei ist darauf hinzuweisen, dass in der TRLV Lärm 3 der arithmetische Mittelwert über die vier Oktaven von 500 Hz bis 4 000 Hz verwendet wird. Weiterhin wird lediglich von sechs Raumbegrenzungsflächen ausgegangen. Bei der Betrachtung der Raumakustik im Sinne der TRLV Lärm 3 sind daher wie bei der ASR A3.7 für die sonstigen Räume mit Sprachkommunikation zwei Mittelwertbildungen anzuwenden. Zum einen wird ein Mittelwert über

alle Flächen im Raum und zum anderen ein Mittelwert über einen bestimmten Frequenzbereich gebildet.

Inwieweit auch andere Flächen im Raum als Schallabsorber einbezogen werden können, wird in der TRLV Lärm 3 nicht beschrieben. Es ist nochmal anzumerken, dass die Technischen Regeln zur Lärm- und Vibrations-Arbeitschutzverordnung [122] nicht für extra-aurale Wirkungen von Lärm unterhalb eines äquivalenten Dauerschallpegels von 80 dB anzuwenden sind, siehe [183]. Somit ist lediglich ein kleiner Ausschnitt von besonders lauten Räumen im Alltag von diesen Vorgaben betroffen.

Die Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung, kurz DGUV, veröffentlicht Hinweise und Vorgaben zur Akustik in Form von Berichten, Arbeitsblättern und Informationsbroschüren. In der DGUV Information 215-440 »Bildschirm- und Büroarbeitsplätze« [36] wird ebenso wie in der DGUV Information 215-441 »Büroplanung« [37] auf die Schrift der Verwaltungsberufsgenossenschaft, kurz VBG, bzw. DGUV Information 215-443 (bisher BGI 5141) »Akustik im Büro« [38] verwiesen. Dieses Dokument wird aktuell überarbeitet und aktualisiert. Im bestehenden Dokument werden anhand zahlreicher Materialbeispiele mögliche Umsetzungen zur raumakustischen Gestaltung von Büros dargestellt. Für industrielle Arbeitsräume werden Hinweise und Vorgaben im Arbeitsblatt »Raumakustik in industriellen Arbeitsräumen« [40] aufgezeigt. Grundlage dieser Betrachtung sind die Vorgaben der TRLV 3 [186], die oben beschrieben wurde. Speziell für Call-Center ist das Lärmschutz-Arbeitsblatt LSA 01-391 »Akustische Raumgestaltung von Call Centern« [39] zu erwähnen.

Fast allen diesen Dokumenten ist gemeinsam, dass zur Raumakustik auf die DIN 18041 wie auch die VDI 2569 verwiesen wird. Aufgrund der Neufassung der DIN 18041 im Jahr 2016 wie auch der VDI 2569 im Jahr 2019 beziehen sich die Verweise meist auf die Vorgängerausgabe der beiden Regelwerke. Zur Bewertung der Geräuschbelastung wird auf die Richtlinie VDI 2058, Blatt 3 [189] »Beurteilung von Lärm am Arbeitsplatz unter Berücksichtigung unterschiedlicher Tätigkeiten« verwiesen, die bereits unter Ziffer 2.4 vorgestellt wurde.

5.4 Weitere Angaben und Empfehlungen

Neben den unter Ziffer 5.2 genannten Regelwerken gibt es weitere Richtlinien, Empfehlungen, Anforderungen und Erfahrungswerte für die raumakustische Gestaltung von Räumen. Einen Schwerpunkt bilden hierbei die Räume in Bildungseinrichtungen für Kinder wie Kindertagesstätten, Kindergärten, Horte und Schulen. Aber auch für Schwimmbäder, Industriehallen oder Gaststätten sind Hinweise zur raumakustischen Konditionierung zu finden.

Schulen und Kitas

Der Leitfaden des Umweltbundesamtes [187] für die Innenhygiene in Schulgebäuden führt neben einer Reihe von Anforderungen an die Hygiene und die Raumluftqualität im Teil C bauliche und raumklimatische Anforderungen an die Akustik an. Neben bauakustischen Vorgaben werden Anforderungen an die Nachhallzeit von Unterrichtsräumen, Sport-, Turn- und Schwimmhallen, Fluren und Treppenhäusern formuliert, die teilweise von den Empfehlungen der DIN 18041 aus dem Jahr 2004 abweichen. Für Unterrichtsräume mit einem Volumen bis 300 m^3 wird, unabhängig vom Volumen, eine Nachhallzeit von $0,5 \pm 0,05 \text{ s}$ empfohlen. Für größere Unterrichtsräume sowie für Sport-, Turn- und Schwimmhallen wird hingegen auf die DIN 18041 [51] aus dem Jahr 2004 verwiesen. In Abbildung 5.14 sind die Empfehlungen des Leitfadens des Umweltbundesamtes den Empfehlungen in Anlehnung an die DIN 18041 aus Abbildung 5.1 gegenübergestellt. Es ist zu erkennen, dass im Bereich typischer Klassenraumvolumina zwischen 100 m^3 bis 400 m^3 die Empfehlungen des Umweltbundesamts unter denen der Nutzungsart A3 »Unterricht/Kommunikation« nach DIN 18041 liegen. Bei einem Volumen von 300 m^3 wird der um 20 % abgesenkte Wert der neu eingeführten Nutzungsart A4, $T_{\text{Soll,A4}}$, empfohlen.

Über die Empfehlungen der aktuell gültigen DIN 18041 hinausgehend wird im Leitfaden des Umweltbundesamtes für Flure und Treppenhäuser eine Empfehlung der Nachhallzeit angegeben. Hierbei wird die folgende Formel für Volumina zwischen 100 m^3 und 800 m^3 angeführt:

$$T_{\text{SOLL,Flur}} = \frac{V}{1\,000 \text{ m}^3} + 0,8 \text{ s} \quad 5.8$$

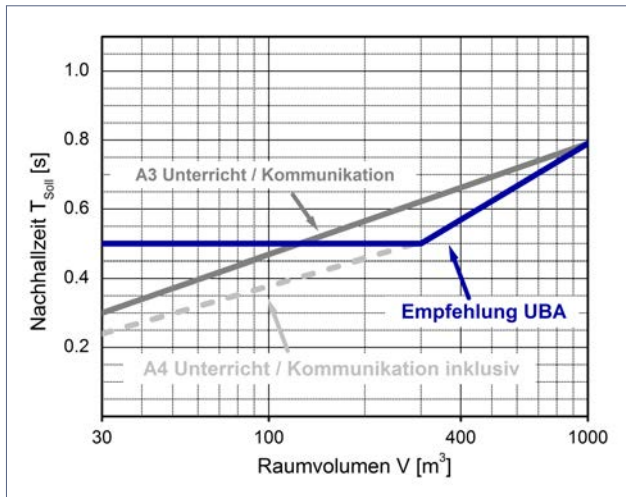


Abbildung 5.14 Empfohlener Wert der Nachhallzeit nach dem Leitfaden des Umweltbundesamts [187] im Vergleich mit $T_{\text{Soll},A3}$ und $T_{\text{Soll},A4}$ nach DIN 18041 [52], siehe Abbildung 5.1

Weiterhin werden Anhaltswerte für kleinere und größere Volumina angeführt, die in Ergänzung zu der Empfehlung nach Gleichung 5.8 in Abbildung 5.15 dargestellt sind.

Zur praktischen akustischen Gestaltung wird in dem Leitfaden des Umweltbundesamtes darauf hingewiesen, dass »alle genannten Kenngrößen bei sachgemäßer Planung mit kommerziell verfügbaren Bauteilen problemlos umsetzbar sind«.

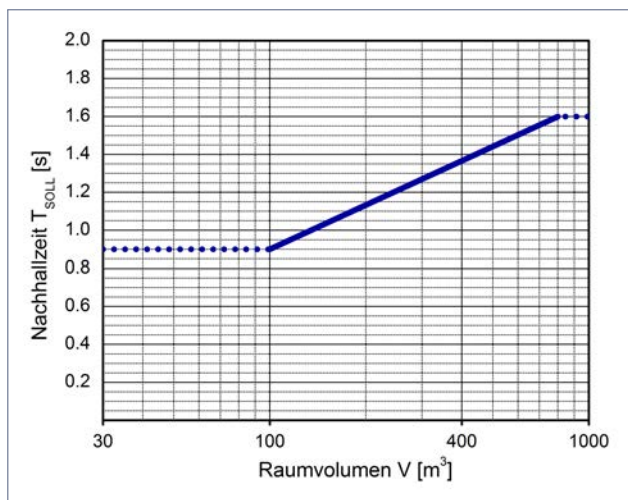
In der Unfallverhütungsvorschrift Kindertageseinrichtungen [41] vom April 2009 wird im Rahmen der Maßnahmen zur Verhütung von Gefahren für Leben und Gesundheit beim Aufenthalt in Kindertageseinrichtungen ausgeführt:

»In Räumen sowie in innenliegenden Aufenthaltsbereichen von Kindertageseinrichtungen sind entsprechend der Nutzung bau- und raumakustische Anforderungen einzuhalten.«

In der zugehörigen Regel wird die DIN 18041 aus dem Jahr 2004 genannt und explizit auf erhöhte raumakustische Anforderungen hingewiesen.

In dem Dokument BG/GUV-SI 8094 der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung vom Januar 2012 mit dem Titel »Klasse(n)-Räume für Schulen«

Abbildung 5.15 Empfohlener Wert der Nachhallzeit nach dem Leitfaden des Umweltbundesamts [187] für Flure und Treppenhäuser



[35] werden Empfehlungen für gesundheits- und lernfördernde Klassenzimmer gegeben. Im Abschnitt zur Raumakustik wird neben einer Darstellung der empfohlenen Nachhallzeit nach DIN 18041 ausführlich auf den Lombard-Effekt eingegangen und ein kurzer Maßnahmenkatalog zur Verbesserung der Raumakustik dargelegt. Im Anhang C werden Anforderungen an die Raumakustik eines Klassenzimmers zusammenfassend aufgeführt. Hier ist neben dem »Gütemerkmal« kurze Nachhallzeit sogar ein Mindestwert für den Sprachübertragungsindex STI von minimal 0,75 angeführt. Diese Aussagen und Hinweise gehen damit weit über die Anforderungen der aktuell gültigen DIN 18041 aus dem Jahr 2016 hinaus.

Eine Reihe von Bundesländern greift ebenfalls das Thema Raumakustik in Bildungseinrichtungen in verschiedenen Publikationen auf. Im Folgenden können davon nur einige exemplarisch genannt werden. Mit dem Leitfaden zur Raumakustik in Unterrichts- und Gruppenräumen des Landesamtes für Gesundheit und Soziales in Mecklenburg-Vorpommern [125] wird eine Anleitung zur DIN 18041 aus dem Jahr 2004 [51] vorgestellt. Die aktuelle Fortschreibung des Leitfadens aus dem Jahr 2011 beruht auf der ersten Fassung aus dem Jahr 2003. Hervorzuheben ist der folgende Hinweis des Leitfadens:

»Die DIN 18041 ist als allgemein anerkannte Regel der Technik bei Neubauten, Umbauten und Sanierungen zu beachten. Für Kindertageseinrichtungen ist gemäß GUV-VS2 Unfallverhütungsvorschrift »Kindertageseinrichtungen« i.V.m. GUV-SR S2 »Regel für Sicherheit und Gesundheitsschutz« die DIN 18041 verbindlich anzuwenden.«

Der Leitfaden zur akustischen Gestaltung von Kindertagesstätten [188] aus Baden-Württemberg geht auf Aspekte des baulichen Schallschutzes sowie auf die Raumakustik ein. Für Gruppenräume mit Volumina unter 300 m^3 wird eine maximale Nachhallzeit von $0,6\text{ s}$ angesetzt. Für Besprechungs- und Sporträume sind in dem Leitfaden Anforderungen an die Nachhallzeit in Abhängigkeit vom Volumen zwischen 50 m^3 und 500 m^3 angegeben. In der Abbildung 5.16 sind die Anforderungen des Leitfadens vergleichend mit den zuvor genannten Empfehlungen, siehe Abbildung 5.1, dargestellt. Es zeigt sich, dass gegenüber den Anforderungen der DIN 18041 bei kleinen Volumina deutlich längere Nachhallzeiten zugelassen werden. Die Anforderung an die Besprechungsräume folgt exakt der Kurve für die Nutzungsart »Unterricht«. Sporträume der Kitas sind im Sinne der Nutzungsart »Sprache« angesetzt. Unklar bleibt, warum gerade für die Gruppenräume eine Empfehlung abweichend von der DIN 18041 aus dem Jahr 2004 gegeben wird.

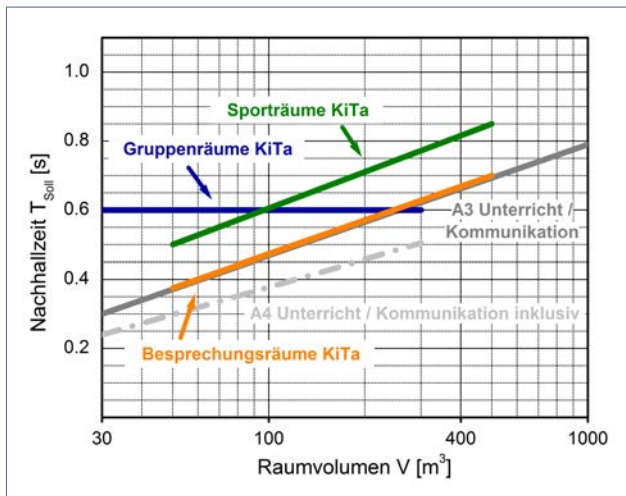


Abbildung 5.16 Anforderung für die Nachhallzeit nach dem Leitfaden zur akustischen Gestaltung von Kindertagesstätten [188]

Für separate Ruhe- und Schlafräume wird eine maximale Nachhallzeit von $T_{\max} = 1,0\text{ s}$ und für separate Treppenhäuser ein Wert von $T_{\max} = 1,5\text{ s}$ gefordert. Diese Empfehlungen folgen aus der Anforderung an adäquate Lärmpegel.

Der Hörbereich wird in diesem Leitfaden für Kitas [188] von 63 Hz bis 8000 Hz angesetzt und entsprechend sind die Anforderungen auch in diesem gegenüber der DIN 18041 erweiterten Frequenzbereich einzuhalten, was aus dem Leitfaden allerdings nicht klar hervorgeht. Dies wäre eine deutliche Verschärfung gegenüber den Anforderungen der DIN 18041 aus dem Jahr 2004 wie auch 2016. Eine weitere Veröffentlichung, »Fraunhofer Richtlinie Akustik« [90], der gleichen Autorenschaft aus dem Jahr 2015 konkretisiert erfreulicherweise den zu verwendenden Frequenzbereich in Übereinstimmung mit den Anforderungen der DIN 18041 von 125 Hz bis 4000 Hz. Allerdings wird nicht begründet, warum von den allgemein anerkannten Anforderungen und Empfehlungen der DIN 18041 [52] abgewichen wird. Dies zeigt sich unter anderem darin, dass die Anforderungen für die Nachhallzeit sich anders als in der DIN 18041 auf den unbesetzten Raumzustand sowie auf Frequenz-Mittelwerte beziehen.

Auch in Hessen [101], im Saarland und in anderen Bundesländern existiert eine Reihe von mehr oder weniger ausführlichen Hinweisen zur raumakustischen Gestaltung von Bildungseinrichtungen. In der Broschüre »Lärmprävention in Kindertageseinrichtungen« der Landesunfallkasse Nordrhein-Westfalen [123] wird sehr anschaulich das Thema Raumakustik und Lärm dargestellt. Auch hier wird wiederum auf die DIN 18041 aus dem Jahr 2004 als das zentrale Regelwerk verwiesen.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass für die Raumakustik in Schulen und Kitas die aktuelle DIN 18041 als allgemein anerkannte Regel der Technik anzusehen ist. Teilweise gehen die zitierten Empfehlungen und Anforderungen über die »Mindest«-Anforderungen der DIN 18041 aus dem Jahr 2004 deutlich hinaus. Dieser Aspekt ist mit der Neufassung der DIN 18041 im Jahr 2016 durch die Einführung der Nutzungsart A4 »Unterricht/Kommunikation inklusiv« umgesetzt worden. Es wäre außerordentlich zu begrüßen, wenn im Rahmen der andauernden Bildungsdebatte die Raumakustik in Schulen und Kitas eine stärkere baurechtliche Verankerung erfahren würde. Dies ist durch Einführung der DIN 18040-Serie zum Barrierefreien Bauen [47, 48, 49] in den Landesbauordnungen bereits erfolgt.

Schwimmbäder

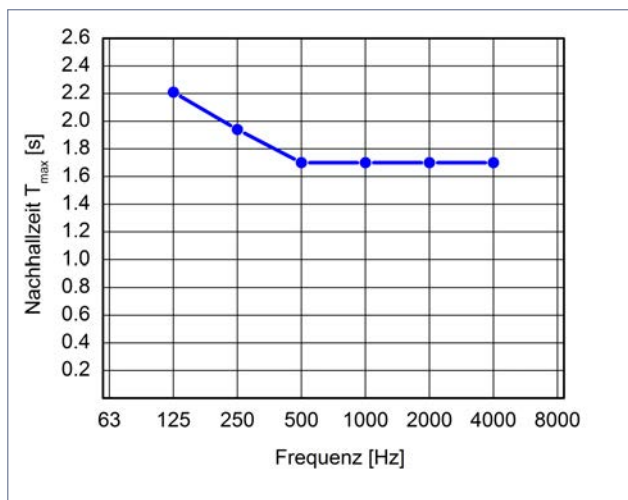
Der Koordinierungskreis Bäder gibt in den Richtlinien für den Bäderbau [34] an, dass es aufgrund der hohen Schallpegel in Schwimmhallen sowie der Anforderung an die Sprachverständlichkeit notwendig ist, die Nachhallzeit in Schwimmhallen zu verringern. In der Richtlinie wird auf die DIN 18041 [51] aus dem Jahr 2004 verwiesen. Darüber hinaus werden Hinweise zur raumakustischen Gestaltung angeführt.

In der 4. Auflage der Richtlinie wurde für Frequenzen oberhalb von 500 Hz eine maximale Nachhallzeit $T_{\max} = 1,7$ s angeführt. Für Frequenzen unter 500 Hz wurde ein Anstieg auf das 1,3-Fache zugelassen. In der Abbildung 5.17 ist der zugehörige Frequenzverlauf der maximalen Nachhallzeit dargestellt. Diese explizite Vorgabe fehlt in der aktuellen 5. Auflage der Richtlinie [34]. Stattdessen wird dort für Schwimmbäder auf die Räume der Gruppe A der DIN 18041 (2004) verwiesen. Andererseits werden Bäder ohne Anforderungen angeführt, wobei dies nicht genauer ausgeführt wird. Für sie sind die Vorgaben der Gruppe B nach DIN 18041 (2004) zu beachten. In der Richtlinie wird dazu angemerkt, dass die Nachhallzeit dann bei Werten von $T = 1,7 - 2,0$ s liegen kann. Es ist darauf hinzuweisen, dass hier eine gewisse Inkonsistenz in der Richtlinie besteht, andererseits die DIN 18041 nur von Schwimmhallen spricht, worin vermutlich die Freizeit- und Spaßbäder nicht mit enthalten sind.

Aus Sicht des Autors hat sich die Vorgabe der 4. Auflage der Richtlinie in vielen Schwimm- und auch Freizeitbädern bewährt. Im Vergleich zu den Anforderungen der DIN 18041 (2004) stellt diese Vorgabe für die Bäder, die der Nutzungsart »Sprache« des Raumtyps A zuzuordnen sind, eine schwächere Anforderung dar. Im Vergleich zu den Schwimmhallen ohne Publikum für rein sportliche Nutzungen nach DIN 18041 (2016) ist diese Vorgabe der Richtlinie allerdings als höhere Anforderung zu sehen.

In der aktuellen Fassung der Richtlinie werden ebenfalls Hinweise für Maßnahmen angeführt. Gegenüber der 4. Auflage werden allerdings keine Mengen für die Schallabsorption mehr angeführt. In der vorherigen Auflage wurde recht konkret, ausgehend von einem Material mit einem Schallabsorptionsgrad $\alpha_s \geq 0,5$ im Frequenzbereich zwischen 500 Hz und 2000 Hz, dargestellt, dass pro 100 m^3 Raumvolumen eine Mindestfläche von 20 m^2 eines solchen Schallabsorbers in die Halle eingebracht werden muss.

Abbildung 5.17 Empfohlener Wert der maximalen Nachhallzeit nach der 4. Auflage der Richtlinien des Koordinierungskreises Bäder



Auch auf die Gefahr von möglichen Flatterechos wird in der aktuellen Fassung der Richtlinie hingewiesen. Es wird empfohlen, dass bei zwei parallelen schallharten Wänden wenigstens eine Wandfläche schallabsorbierend gestaltet werden sollte. Auch die Schrägstellung um mindestens 5° wird zur Vermeidung von Flatterechos zwischen Wänden oder auch zwischen schallharter Wasseroberfläche und Decke erwähnt.

In der 5. Auflage der Richtlinien für den Bäderbau [34] wird das Thema Notfallalarmierung aufgegriffen. Sofern ein Bad als allgemeiner öffentlicher Aufenthaltsbereich angesehen wird, sind die Regeln des Alarmierungskonzepts zu beachten. Die Planung und Ausführung der Sprachalarmierungsanlage ist mit den raumakustischen Bedingungen im Bad abzustimmen. Die Richtlinie fordert hierzu für sämtliche Aufenthaltsbereiche eine Nachhallzeit T von 1,2 s bis maximal 1,5 s zur Gewährleistung einer ausreichenden Sprachverständlichkeit. Für die eigentlichen Schwimmhallen ist je nach Größe und Anzahl der möglichen Gäste eine Lautsprechanlage zwingend erforderlich. Die Sprachverständlichkeit bei Badebetrieb, also unter Berücksichtigung der Störgeräusche, einer solchen Anlage muss einen Mindestwert des Sprachverständlichkeitsindex STI von 0,5 erreichen. Auch dieser Aspekt macht die Bedeutung einer angemessenen Nachhallzeit in Bädern deutlich.

Bibliotheken

Für Bibliotheken wird in der DIN 67700 »Bau von Bibliotheken und Archiven - Anforderungen und Empfehlungen für die Planung« [59] differenziert auf die Vorgaben der DIN 18041 [52] eingegangen. Für verschiedene Funktionsbereiche in Bibliotheken wird auf die Nutzungsarten der DIN 18041 [52] verwiesen, siehe Tabelle 5.14. Die Übernahme der Empfehlungen für Räume der Gruppe B in der DIN 67700 konkretisiert die in der DIN 18041 aus dem Jahr 2016 angeführten Beispiele.

Funktionsbereich nach DIN 67700		Nutzungsart nach DIN 18041
Nutzerplätze	Arbeitsplatz für konzentrierte Einzelarbeit	B4
	Gruppenarbeitszone	B3
	Sitzstufen	B3
	Einzelarbeitsraum	B5
	Gruppenarbeitsraum	B4
	Schulungsraum	A4
Servicebereich	Mitarbeiterarbeitsplatz	B4
	Scannen/Kopieren in Selbstbedienung	B3 / B5
Medienlogistik	Sortierarbeitsplatz	B4 / B5
Werkstätten	Trockenreinigung an Sicherheitswerkbank, Digitalisierung an Aufsichtsscanner bis DIN A1, Mikroverfilmung an Aufsichtskamera bis DIN A1	B4 / B5

Tabelle 5.14 Verknüpfung von Funktionsbereichen in Bibliotheken und Archiven nach DIN 67700 und Nutzungsarten nach DIN 18041

Empfehlungen für Wohnräume

Vermehrt werden in größeren und modern eingerichteten Wohngebäuden auch raumakustische Probleme thematisiert. Grundrisse mit offenen Küchen und Wohnbereichen, teilweise ohne Abtrennung zu Bädern und Schlafräumen, die sich über mehrere Geschosse erstrecken, führen zu großen Volumina. Dies gepaart mit einer nur wenig schallabsorbierend gestalteten Einrichtung und vielen Glasflächen lassen störende Reflexionen und einen unangenehmen Höreindruck entstehen.

Aufgrund eigener Messungen kann berichtet werden, dass Werte der Nachhallzeit von mehr als 1 Sekunde in solchen Räumen im Allgemeinen nicht akzeptiert werden. Bei Werten von weniger als 0,3 s werden Wohnräume als zu trocken und überdämpft beschrieben. Auch wenn die DIN 18041 [52] streng genommen nicht für Wohnungen und Wohnräume anzuwenden ist, können die dort genannten Zielwerte für die Nachhallzeit verwendet werden. Es empfiehlt sich, für Räume mit viel Kommunikation wie Wohnküchen, Esszimmer oder auch größere Wohnzimmer mit Dielen und offenen Bereichen die Anforderungen der Nutzungsart A3 unter Berücksichtigung des Toleranzbereichs nach Abbildung 5.2 zu verwenden. Für Räume mit hochwertigen Multimedia-Ausstattungen oder auch private Kinos können die Anforderungen der Nutzungsart A4 verwendet werden.

Problematisch im privaten Umfeld ist häufig die gestalterische Umsetzung der notwendigen Maßnahmen. Klassische gerasterte oder gelochte Akustikdecken kommen in der Regel nicht in Frage. Vielmehr sind designorientierte Produkte wie Wandbilder mit akustischer Wirkung, Teppiche oder auch Vorhänge gefragt.

Weitere Angaben

Auch in anderen Regelwerken sind Hinweise zur Nachhallzeit in Räumen aufgeführt, von denen im Folgenden einige ohne den Anspruch auf Vollständigkeit exemplarisch genannt werden.

In der VDI 2081, Blatt 1, »Geräuscherzeugung und Lärminderung in Raumlufttechnischen Anlagen« [190] werden für eine Reihe von Raumtypen Richtwerte für mittlere Nachhallzeiten angegeben. Diese Richtwerte können zur Abschätzung des aus der raumlufttechnischen Anlage zu erwartenden A-bewerteten Schallpegels im Raum herangezogen werden. Gegenüber der DIN 18041 werden mehr Raumtypen aufgeführt, die in der Regel auch raumakustisch günstig gestaltet werden sollen. Wohnräume, ob im Hotel oder auch privaten Umfeld, Gaststätten, Museen oder andere öffentliche Räume sind nach diesen Hinweisen ebenfalls raumakustisch zu betrachten. Danach ist eine »gute Akustik« nicht nur vom Geräuscheintrag durch die raumlufttechnischen Anlagen, sondern auch von der Nachhallzeit abhängig.

Raumart	Beispiel	Mittlere Nachhallzeit
Arbeitsräume	Einzelbüro	0,5 s
	Großraumbüro	0,5 s
	Werkstätten	1,5 s
	Chemie-Labor	2,0 s
Versammlungsstätten	Konzertsaal, Opernhaus	1,5 s
	Theater, Kino	1,0 s
	Konferenzraum	1,0 s
Wohnräume	Hotelzimmer	0,5 s
Sozialräume	Ruheraum, Pausenraum	1,0 s
	Wasch- und WC-Raum	2,0 s
Unterrichtsräume	Lesesaal	1,0 s
	Klassen- und Seminarraum	1,0 s
	Hörsaal	1,0 s
Krankenhaus gemäß DIN 1946-4	Bettenzimmer, Ruheraum	1,0 s
	Operationsraum	2,0 s
	Untersuchungsraum	2,0 s
	Labore	2,0 s
	Bäder und Schwimmbäder	2,0 s
	Umkleideräume	2,0 s
	Bettenzimmer, normal	1,0 s
Räume mit Publikumsverkehr	Museen	1,0 s
	Gaststätten	1,5 s
	Verkaufsraum	1,0 s
	Schalterhalle	1,5 s
Sportstätten	Turn- und Sporthallen	2,0 s
	Schwimmbäder	2,0 s
sonstige Räume	Rundfunkstudio	0,5 s
	Fernsehstudio	0,5 s
	EDV-Raum	1,5 s
	Reiner Raum	1,5 s
	Küche	1,5 s
	Schutzraum	2,0 s

Tabelle 5.15 Richtwerte für die mittlere Nachhallzeit nach Tabelle 2 der VDI 2081, Blatt 1 [190]. In fett sind die Beispiele hervorgehoben, für die es auch in der DIN 18041 [52] teilweise abweichende Angaben und Empfehlungen gibt.

Die DIN EN ISO 11690, Teil 1, »Richtlinien für die Gestaltung lärmarmer maschinenbestückter Arbeitsstätten« [74] führt unter Ziffer 7 zur Behandlung von Lärmproblemen in Arbeitsstätten Werte für die Nachhallzeit sowie die Schalldruckpegelabnahme im Raum an. Für Raumvolumina bis 200 m^3 wird eine Nachhallzeit von 0,5 s bis 0,8 s und zwischen 200 m^3 und 1000 m^3 von 0,8 s bis 1,3 s empfohlen. Für Räume über 1000 m^3 wird keine Nachhall-Empfehlung gegeben, sondern werden Werte zwischen 3 dB und 4 dB für die Schalldruckpegelabnahme DL_2 empfohlen. Für Räume unter 1000 m^3 wird keine Empfehlung für DL_2 angeführt. Die Frequenzabhängigkeit der Nachhallzeit wird bei der Definition des Begriffs erwähnt aber nicht weiter konkretisiert.

Die DIN 15609 »Tagungsstätten« [44] nimmt direkten Bezug auf die Empfehlungen der DIN 18041 und weist darauf hin, dass diese Vorgaben für unterschiedliche Raumgrößen und Nutzungen zu beachten sind. Angemerkt wird, dass auch in Kombination mit einer Beschallungsanlage die Raumakustik so gestaltet sein muss, dass ein Sprachübertragungsindex von $STI > 0,55$ erreicht wird. Zur Planung sind Nachhallzeit, Oberflächenmaterialien, Schallausbreitung, Störpegel und Raumgeometrie zu beachten.

Wie unter Ziffer 3.6.5 dargelegt, wird in der Technischen Regel zur Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung Teil 3 [186] (kurz TRLV Lärm 3) ausgeführt, dass der Stand der Technik dann als eingehalten gilt, wenn der flächen- und frequenzgemittelte Schallabsorptionsgrad $\bar{\alpha}$ mindestens 0,3 beträgt. Im folgenden Kapitel 6 wird darauf eingegangen, zu welchen Nachhallzeiten im Raum diese Vorgabe führt. Es sei dahingestellt, ob dies als Stand der Technik zu sehen ist.

6 Raumakustische Planung

Die Planung der Akustik eines Raumes erfordert prinzipiell die Einbeziehung der späteren Nutzungen. Ohne Kenntnis der Wünsche und Erfordernisse der Menschen, für die der Raum hergestellt und ausgestattet wird, ist eine raumakustische Planung kaum möglich. Insbesondere bei sehr prestigeträchtigen Bauvorhaben wird die raumakustische Gestaltung häufig im Mystischen gehalten. Dabei kann nahezu jeder Raum akustisch optimal für die gewünschte Nutzung gestaltet werden.

Kleinere und einfach strukturierte Räume, also die meisten Räume des alltäglichen Lebens, können in der Regel anhand der Nachhallzeit als raumakustische Kenngröße geplant werden, wobei hinsichtlich der Positionierung der schallabsorbierenden Aufbauten im Raum einige Grundregeln zu beachten sind. Diese »Nachhall-Akustik« beruht auf der Annahme eines diffusen Schallfeldes. Für viele der in diesem Buch behandelten Alltagsräume ist es ausreichend, die raumakustische Planung mit der aus rein wissenschaftlicher Sicht sicherlich starken Näherung der Sabineschen Nachhallformel durchzuführen.

Nach einigen grundsätzlichen Anmerkungen wird in diesem Kapitel unter Ziffer 6.2 die Sabinesche Nachhallformel als Grundlage für raumakustische Planungen von Alltagsräumen vorgestellt. Anhand eines konkreten Beispiels wird die Anwendung der Formel demonstriert. Anschließend werden die Grenzen dieser Art der Berechnung diskutiert.

Ein Thema mit zunehmender Bedeutung gerade in Mehrpersonenbüros stellt die Schallabschirmung dar. Anders als in Aufführungsräumen oder Vortragsälen ist nicht die Versorgung eines Hörers mit Direktschall, sondern die angemessene Minderung des direkten Schallanteils das Ziel. Den Abschluss des Kapitels bildet ein Ausblick auf den aktuellen Stand der rechnergestützten Simulationsverfahren in der Raumakustik sowie das bei Bauherrschaften und teilweise auch Architekten gänzlich unbekannte Vorhandensein der Raumakustik in der HOAI [103].

6.1 Planungsablauf

Prinzipiell kann bei der raumakustischen Planung zwischen einer Neuplanung und der Optimierung eines Raums unterschieden werden. In einem existierenden Raum mit akustischen Defiziten besteht die Möglichkeit, die Situation durch eine Messung objektiv zu erfassen. Bei einer Neuplanung gibt es diese Möglichkeit nicht. Die beiden Fälle Neuplanung und Optimierung eines Raums werden im Folgenden getrennt betrachtet.

Die raumakustische Planung eines Raums erfordert für beide Fälle eine Abstimmung mit den Nutzern, den weiteren Planern und gegebenenfalls auch anderen Beteiligten. Hier treffen häufig unterschiedliche Vorstellungen und Wünsche aufeinander, die nicht allein akustische Belange betreffen, siehe Abbildung 1.1. Nur gemeinsam kann erreicht werden, dass die Erwartungen und Vorstellungen hinsichtlich der Hörsamkeit im Raum erfüllt werden. Selbstverständlich ist nicht in allen Bauvorhaben der gesamte Stab der angeführten Planer beteiligt.

Je nach Raum und Nutzung sind unterschiedliche Methoden zur Planung anzuwenden. Während bei akustisch anspruchsvollen Räumen umfangreiche Modelle, Computermodelle oder auch physikalisch verkleinerte Modelle, verwendet werden, ist für einen einfach strukturierten Raum eine überschlägige Abschätzung der Nachhallzeit meist ausreichend. Die Wahl der Planungsmethode liegt hierbei im Ermessen des planenden Akustikers. Auch Erfahrungswissen führt mitunter zu beachtenswerten Ergebnissen. Auf die verschiedenen Planungsmethoden wird im weiteren Verlauf dieses Kapitels ab Ziffer 6.2 eingegangen. Für die Räume des Alltags mit häufig nicht allzu großen Volumina genügt in der Regel eine Betrachtung anhand der Sabine'schen Nachhallformel.

Neuplanung

In Abbildung 6.1 ist der prinzipielle Ablauf einer raumakustischen Planung bei einem Neubauvorhaben dargestellt. Es wird davon ausgegangen, dass der Raumakustikplaner von Beginn der Planung an mit einbezogen wird. Dies ist in der Praxis erfahrungsgemäß nicht der Regelfall.

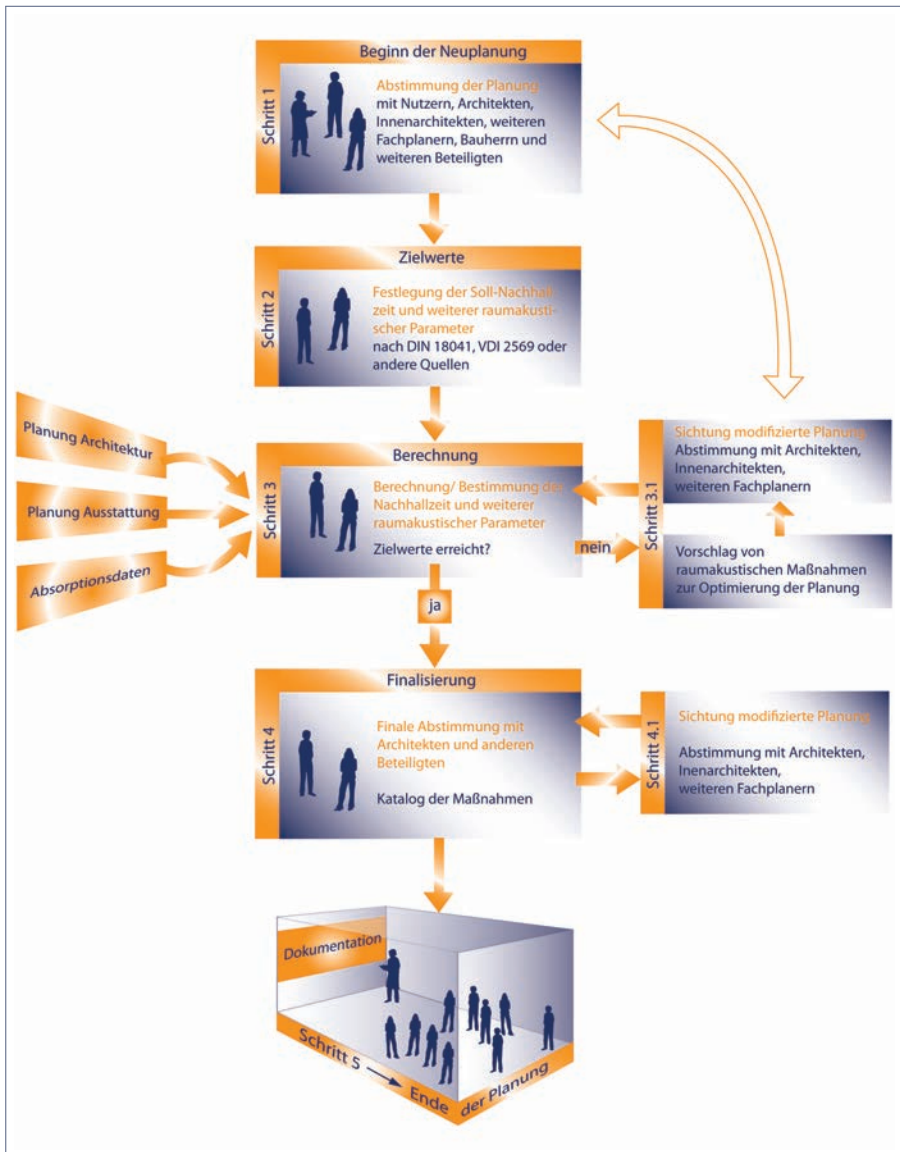


Abbildung 6.1 Prinzipieller Ablauf einer raumakustischen Planung bei einem Neubau

Schritt 1 – Planungsbeginn

Allgemeine Planungsgrundsätze sollten frühzeitig mit den Architekten und weiteren Fachplanern erörtert werden. Für akustisch anspruchsvolle Räume wie Auditorien oder Mehrzweckhallen sind Hinweise hinsichtlich der Raumform wie auch weitere Aspekte der raumakustischen Planung einzubringen. Für die nicht in diesem Buch behandelten Konzertsäle, Opernhäuser und Theater ist diese architektonisch-entwurfliche Klärung zwingend notwendig und für die in diesem Buch betrachteten Räume in der Regel auch hilfreich.

Schritt 2 – Zielwerte

Anhand dieser Abstimmungen zur Raumform, -ausstattung und -nutzung kann in einem zweiten Planungsschritt die Festlegung der Nachhallzeit T_{SOLL} und gegebenenfalls weiterer raumakustischer Parameter erfolgen. Je nach Raum und Nutzung können hier Anforderungen der vorgestellten Regelwerke wie der DIN 18401 [52] oder der VDI 2569 [192] verwendet oder aber eigene Empfehlungen des planenden Akustikers herangezogen werden. Welche Kenngrößen neben der Nachhallzeit notwendig und sinnvoll sind, liegt letztlich auch im Ermessen des verantwortlichen Planers. Es empfiehlt sich, dass in der abschließenden Dokumentation eine Begründung zur Wahl der jeweiligen Anforderungen erfolgt, die auch den Bezug zu den Abstimmungen mit den Nutzern aufgreift. Diese Definition kann als Planungsziel auch rechtlich aufgegriffen werden und sollte sich nach Umsetzung der Baumaßnahme messtechnisch überprüfen lassen.

Schritt 3 – Berechnung

In einem dritten Planungsschritt erfolgt auf Grundlage der architektonischen Planung, der Vorgaben zur Ausstattung des Raums und der zugehörigen Absorptionsdaten die Berechnung der zu erwartenden, frequenzabhängigen Nachhallzeit und gegebenenfalls weiterer raumakustischer Parameter. Werden die Anforderungen erfüllt, kann die Planung abgeschlossen werden, siehe Schritt 4.

Wird der Zielbereich der Nachhallzeit oder auch der weiteren Ziel-Parameter nicht erreicht, ist eine Modifikation der Planung, siehe Schritt 3.1 (Abb. 6.1), notwendig. Weitere Abstimmungen sind gegebenenfalls mit dem Bauherrn sowie anderen Fachplanern notwendig und können durchaus den architektonischen Entwurf betreffen. Unter Umständen muss sogar die gesamte Planung noch einmal begonnen werden, sofern sich herausstellt, dass unvereinbare Erfordernisse nur durch einen neuen Entwurf aufgelöst werden können.

Schritt 4 – Finalisierung

In diesem Planungsschritt ist die Positionierung der raumakustisch wirksamen Elemente im Raum festzulegen. Dabei ist auf eventuell spezielle Raumformen einzugehen. Mögliche Flatterechos zwischen parallelen und gut reflektierenden Wänden sind zu vermeiden.

Dieser Planungsschritt mündet in der Regel in einem Katalog zur Beschreibung der notwendigen Maßnahmen. Der Maßnahmenkatalog sollte noch einmal mit allen beteiligten Planern abgestimmt werden, siehe Schritt 4.1 (Abb. 6.1). Dies kann mitunter auch während der Ausführung der Maßnahmen in der Bauphase notwendig werden.

Bei sehr hohen Anforderungen an die Raumakustik ist es ebenfalls empfehlenswert, die Ausführung der geplanten Maßnahmen während der Bauphase messtechnisch zu begleiten. Anhand solcher baubegleitenden Messungen kann die Planung überprüft und gegebenenfalls angepasst werden.

Schritt 5 – Dokumentation

Zum Abschluss der Planung sollte eine Dokumentation erfolgen, anhand derer das Ergebnis der Planungen nachvollziehbar dargestellt wird. Der Zeitpunkt dieser abschließenden Dokumentation kann durchaus während oder auch nach der Ausführung eines Neubaus erfolgen.

Bei der Dokumentation ergibt sich häufig die Frage, welchen Detaillierungsgrad ein solches Dokument haben sollte. Es empfiehlt sich, dass zumindest die wichtigsten Grundlagen der Planung wie das Raumvolumen, die Annahmen zu den akustisch relevanten Flächen sowie das Ergebnis der Berechnung in Berichts- oder Gutachtenform dargestellt werden. Für umfangreichere Planungen oder anspruchsvolle Räume sollten auch die verwendeten Absorptionsgrade der Materialien dargestellt, Quellen dafür benannt und insgesamt auch die verwendeten Methoden umrissen werden. Bei Vorhaben, für die eine Planung anhand eines dreidimensionalen Raummodells zur raumakustischen Simulation durchgeführt wird, kann eine entsprechende Dokumentation recht umfangreich sein. Hier bietet es sich an, die Ergebnisse auch in Form von Hörbeispielen, die durch Auralisation erzeugt werden, zu präsentieren.

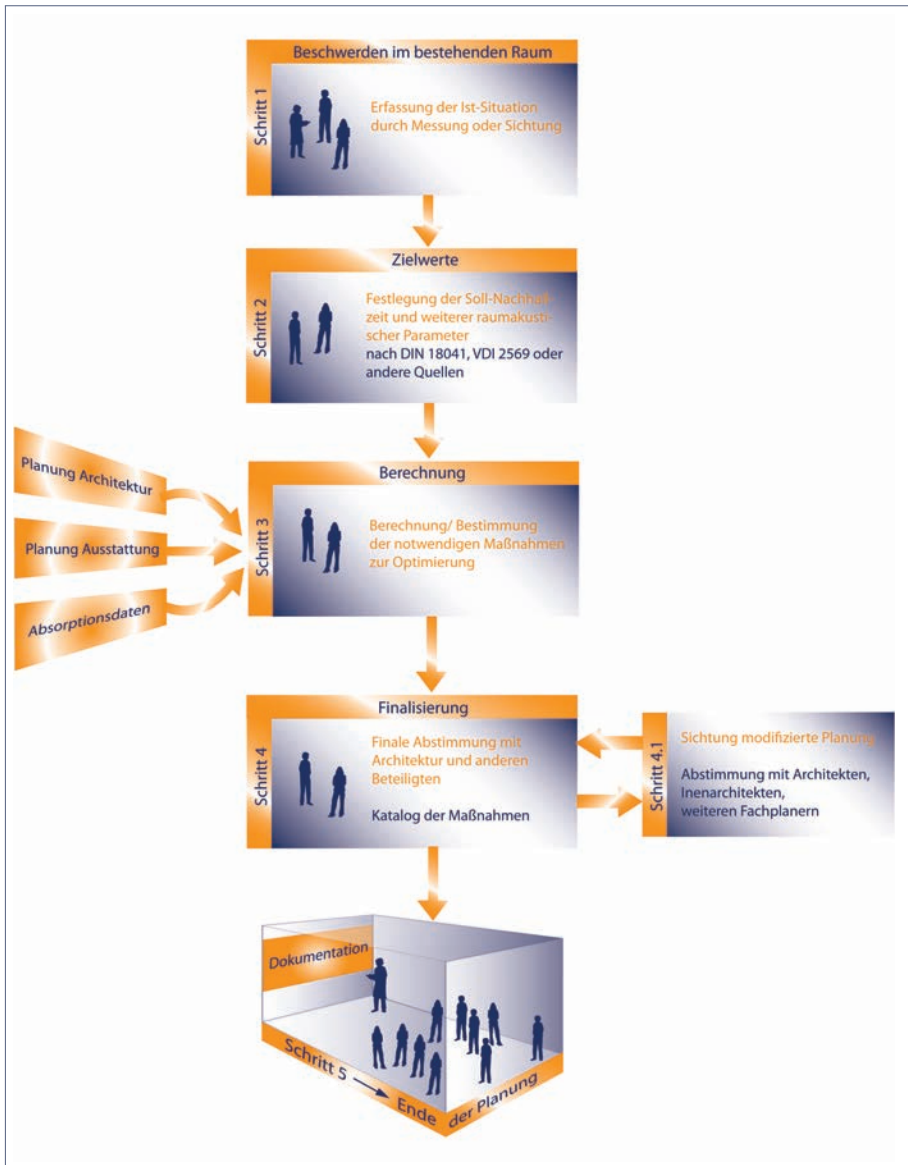


Abbildung 6.2 Prinzipieller Ablauf einer raumakustischen Planung zur Optimierung eines existierenden Raums

Optimierung eines bestehenden Raums

Abbildung 6.2 zeigt den prinzipiellen Ablauf einer raumakustischen Planung zur Optimierung eines bestehenden Raums. Gegenüber der Neuplanung ist das Vorgehen geringfügig anders.

Kommt es in einem bestehenden Raum zu Beschwerden, so kann anhand der subjektiven Äußerungen der Betroffenen oftmals abgeschätzt werden, welche Defizite in einem Raum die Klagen ausgelöst haben könnten. Anhand einer raumakustischen Messung, z. B. der Nachhallzeit oder auch weiterer Kenngrößen, kann die Situation in dem Raum weiterhin objektiv erfasst werden, siehe **Schritt 1**. Bei sehr einfach strukturierten Räumen kann diese Ist-Erfassung auch anhand einer Sichtung erfolgen. Dabei sind dann neben der Aufnahme der geometrischen Gegebenheiten auch die Ausstattung des Raums aufzunehmen, um so die notwendigen Kenngrößen des Raums zu berechnen.

Anhand der vorgestellten einschlägigen Regelwerke können die Ergebnisse der Messung bzw. Berechnung auf Grundlage der Sichtung bewertet werden. Hierzu ist wie bei **Schritt 2** in der Neuplanung die Festlegung der Nachhallzeit T_{SOLL} und gegebenenfalls weiterer raumakustischer Parameter notwendig. Ab und an wird durch diese Objektivierung der Situation im Raum klar, dass zumindest keine baulich-akustischen Defizite in dem untersuchten Raum vorhanden sind, sondern die Beschwerden zur Akustik durch andere Faktoren oder auch subjektive Einschätzungen ausgelöst werden.

Die Ergebnisse aus Schritt 1 dienen als Grundlage für die weitere Planung zur akustischen Optimierung des Raums durch eine Berechnung zur Bestimmung der notwendigen Maßnahmen. Häufig ist in einen Raum zusätzliche Absorption einzubringen. Eher selten sind Absorberflächen zu entfernen, was aber auch durchaus ein mögliches Ergebnis darstellt.

Da mit einer Messung der komplett vorhandene Raumzustand objektiv erfasst wird, besitzt eine Planung auf Grundlage einer Messung in der Regel eine höhere Genauigkeit als eine rein rechnerische Betrachtung, zu der meist eine Reihe von Annahmen und Abschätzungen zur Wirkung der Materialien getroffen wird.

Schritt 4 und **Schritt 5** sind analog zu dem Vorgehen bei einer Neuplanung zu sehen.

6.2 Klassisch: Sabinesche Nachhallformel

Die klassische Betrachtung zur Berechnung der Nachhallzeit geht auf W. C. Sabine zurück, der um 1900 anhand von umfangreichen Messungen die nach ihm benannte Formel empirisch abgeleitet hat. Spätere Forschungen zeigten, dass dieser Zusammenhang auch theoretisch abgeleitet werden kann. Eine entsprechende Darstellung der Ableitung ist beispielsweise im Buch von Kuttruff [119] zu finden. Grundvoraussetzung zur Anwendung der Sabineschen Nachhallformel ist die Ausbildung bzw. Annahme eines diffusen Schallfeldes im Raum.

Die Nachhallzeit T ergibt sich wie folgt:

$$T = 0,163 \frac{V}{A} \quad 6.1$$

mit dem Raumvolumen V und der äquivalenten Absorptionsfläche A des Raums, siehe Abschnitt 3.6.1.

Aus dieser grundlegenden Formel kann in der Planung bereits eine erste überschlägige Abschätzung zur benötigten äquivalenten Absorptionsfläche abgeleitet werden. In Abbildung 6.3 ist für verschiedene Raumvolumina zwischen 30 m^3 und 5000 m^3 der Zusammenhang zwischen äquivalenter Absorptionsfläche und der Nachhallzeit im Raum dargestellt.

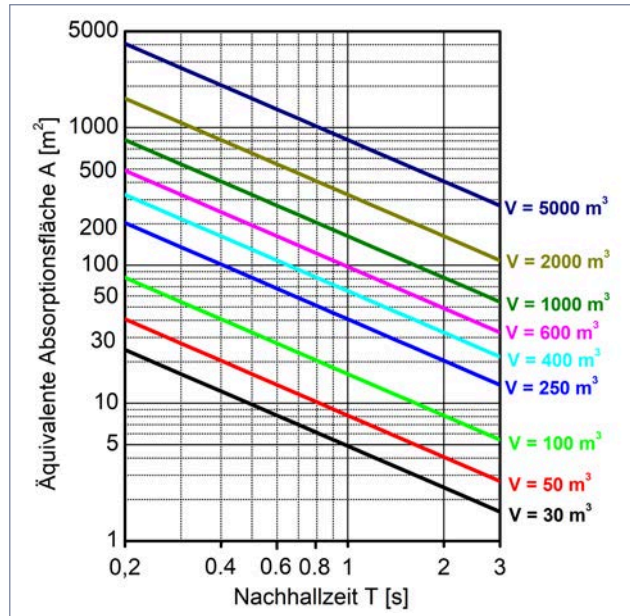
Für eine Nachhallzeit von $0,8 \text{ s}$ wird in einem Raum mit einem Volumen V von 400 m^3 eine äquivalente Absorptionsfläche A von circa 80 m^2 benötigt.

In der Regel wird die raumakustische Planung eines Raums für die Oktaven zwischen 125 Hz und 4000 Hz oder Terzen zwischen 100 Hz und 5000 Hz nach Gleichung 6.1 durchgeführt. Die Bestimmung der äquivalenten Absorptionsfläche A erfolgt rechnerisch für jede Oktave gesondert.

Bei bestehenden Räumen, in denen eine Optimierung der akustischen Bedingungen notwendig ist, sollte eine Messung der Nachhallzeit durchgeführt werden, um die vorhandene äquivalente Absorptionsfläche eines Raums durch Inversion der Sabineschen Nachhallformel, Gleichung 6.1, d. h.

$$A = 0,163 \frac{V}{T} \quad 6.2$$

Abbildung 6.3 Zusammenhang von äquivalenter Absorptionsfläche A und Nachhallzeit T nach Gleichung 6.1 bei verschiedenen Raumvolumina V



zu ermitteln. Messungen sind ebenfalls zu empfehlen, wenn die Wirksamkeit bestimmter akustischer Maßnahmen während der Ausführung überprüft werden soll.

Rechnerisch ergibt sich die äquivalente Absorptionsfläche A eines Raums nach DIN EN 12354, Teil 6 [61], dort Formel (1), wie folgt:

$$A = \sum_{i=1}^n \alpha_{s,i} \times S_i + \sum_{j=1}^o A_{\text{obj},j} + \sum_{k=1}^p \alpha_{s,k} \times S_k + A_{\text{air}} \quad 6.3$$

Die Anzahl der im Raum vorhandenen Absorber wird durch die Summen entsprechend berücksichtigt mit:

- n die Anzahl der Oberflächen mit der Laufnummer i
- o die Anzahl der Objekte mit der Laufnummer j
- p die Anzahl der Objektanordnungen mit der Laufnummer k

Die schallabsorbierende Wirkung der n Oberflächen, o Objekte und p Objektanordnungen geht hierbei wie folgt ein:

- $\alpha_{s,i}$ der Schallabsorptionsgrad der Teilfläche S_i
nach DIN EN ISO 354 [72]
- $A_{obj,j}$ die äquivalente Schallabsorptionsfläche nicht-flächenhafter
Objekte oder Personen im Raum in m^2 nach DIN EN ISO 354
[72]
- $\alpha_{s,k}$ der Schallabsorptionsgrad der Objektanordnung mit einer
Oberfläche S_k nach DIN EN ISO 354 [72]

Der Schallabsorptionsgrad $\alpha_{s,i}$ der i -ten Teilfläche S_i kann entnommen werden aus Tabellen wie im Anhang 8.1, aus Literaturtabellen wie der DIN-Tabelle aus dem Jahr 1968 [42], aus Büchern oder auch aus Prüfzeugnissen nach DIN EN ISO 354 [72], die Hersteller von Akustikmaterialien in der Regel zur Verfügung stellen. Ebenso sind Werte der äquivalenten Absorptionsfläche von Objekten A_{obj} aus diesen Quellen erhältlich. Auch hier sollte bei Herstellerangaben darauf geachtet werden, dass die Messungen nach den Vorgaben der DIN EN ISO 354 [72] durchgeführt wurden.

Die äquivalente Absorptionsfläche A_{air} ergibt sich aus:

$$A_{air} = 4 m V (1 - \Psi) \quad 6.4$$

mit:

- m der Leistungs-Dämpfungskoeffizient in Luft, in Neper je Meter
- V das Volumen des leeren Raums, in Kubikmeter
- Ψ der Objektanteil (Volumina der Objekte im Raum)

In der Tabelle 6.1 sind Werte des Dämpfungskoeffizienten m in 10^{-3} Neper pro Meter angegeben nach DIN EN 12354-6 [61], dort Tabelle 1³. Das Volumen V bezieht sich nach DIN 18041 [52] zur Bestimmung der Anforderungen auf das gesamte Raumvolumen ohne Abzug der Volumina der Objekte im Raum. In der DIN EN 12354-6 [61] wird das Raumvolumen um das Volumen der Objekte im Raum reduziert. Der Einfluss dieser meist geringen Differenz beim Raumvolumen ist in der Regel bei Räumen des Alltags zu vernachlässigen.

3 Das Neper ist definiert als der natürliche Logarithmus \ln eines Verhältnisses linearer Größen. Für die Umrechnung von Neper, kurz Np, in das auf den dekadischen Logarithmus \log bezogene Dezibel gilt: $1 \text{ Np} = 8,6858 \text{ dB}$.

Klimabedingung	Dämpfungskoeffizient m [10^{-3} Np/m]					
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
10 °C, 30 % bis 50 % relative Luftfeuchte	0,1	0,2	0,5	1,1	2,7	9,4
10 °C, 50 % bis 70 % relative Luftfeuchte	0,1	0,2	0,5	0,8	1,8	5,9
10 °C, 70 % bis 90 % relative Luftfeuchte	0,1	0,2	0,5	0,7	1,4	4,4
20 °C, 30 % bis 50 % relative Luftfeuchte	0,1	0,3	0,6	1,0	1,9	5,8
20 °C, 50 % bis 70 % relative Luftfeuchte	0,1	0,3	0,6	1,0	1,7	4,1
20 °C, 70 % bis 90 % relative Luftfeuchte	0,1	0,3	0,6	1,1	1,7	3,5

Tabelle 6.1 Dämpfungskoeffizient m in Luft in Abhängigkeit von Luftfeuchte und Temperatur für die Oktaven von 125 Hz bis 4k Hz nach DIN EN 12354-6 [61] in 10^{-3} Neper pro Meter.

Die Dämpfung der Luft kann in großen Räumen beträchtlich zur Schallabsorption bei hohen Frequenzen beitragen. Nach Hinweis in der DIN EN ISO 3382-2 [70] ist die Luftabsorption vernachlässigbar, wenn die Nachhallzeit bei 2 kHz kürzer als 1,5 s und bei 4 kHz kürzer als 0,8 s ist. Ein großer Raum liegt im Sinne dieser Norm bei einem Volumen von mehr als 300 m^3 vor.

Die Schalldämpfung durch Luftübertragung wird in ISO 9613-1 [109] als eine Funktion der Temperatur, der Luftfeuchte und der Frequenz festgelegt. Die Werte der Tabelle 6.1 wurden in Übereinstimmung mit ISO 9613-1 [109] ermittelt. Wenn andere besondere Bedingungen gelten, sind die Werte des Dämpfungskoeffizienten nach ISO 9613-1 zu bestimmen. Bei raumakustischen Planungen empfiehlt es sich, die Absorption der Luft immer zu berücksichtigen, wobei es ausreichend ist, eine klimatische Situation (in der Regel 20 °C, 50 % bis 70 % relative Luftfeuchte) zu verwenden.

In vielen Fällen kann die Gleichung 6.3 zur Bestimmung der äquivalenten Absorptionsfläche in einem Raum stark vereinfacht werden. Hierzu werden im Folgenden die einzelnen Summanden einzeln diskutiert. Der erste Summand, $\sum_{i=1}^n \alpha_{s,i} \times S_i$, beschreibt die Absorption durch flächige Absorber wie Decke,

Wand und Boden im Raum. Selbst wenn für viele Räume zwei bis drei Materialien an Wänden, z.B. Tapete oder Putz, Verglasung und Türen, angenommen werden müssen und auch an Decke und Boden zwei Materialien vorhanden sind, so kommt es in Räumen des Alltags selten zu mehr als zehn bis fünfzehn verschiedenen akustisch wirksamen Materialien.

Der zweite Summand (in Gleichung 6.3), $\sum_{j=1}^o A_{\text{obj},j}$, zur Berücksichtigung der nicht-flächenhaften Absorber wird immer dann verwendet, wenn explizit schallabsorbierende Objekte, wie textile Sitzmöbel, absorbierende Schränke oder auch Personen im Raum vorhanden sind. Auch hier bleibt die Anzahl der verschiedenen Objekte oder auch Personen in der Regel deutlich im einstelligen Bereich.

Der dritte Summand (in Gleichung 6.3), $\sum_{k=1}^p \alpha_{s,k} \times S_k$, wird in der Praxis eher selten verwendet, da die jeweiligen Objektanordnungen häufig entweder als Objekte oder aber die einzelnen absorbierenden Flächen als flächige Absorber berücksichtigt werden. Nachfolgend wird dieser Term nicht mehr berücksichtigt. Bei Vernachlässigung der Luftabsorption kann Gleichung 6.3 somit vereinfacht werden zu:

$$A = \sum_{i=1}^n \alpha_{s,i} \times S_i + \sum_{j=1}^o A_{\text{obj},j} \quad 6.5$$

Unter Vernachlässigung der Luftabsorption sowie der Objektanordnungen kann die Sabinesche Nachhallformel (siehe Gleichung 6.1) durch Einsetzen der Gleichung 6.5 wie folgt umgeschrieben werden:

$$\begin{aligned} T &= 0,163 \frac{V}{A} \\ &= 0,163 \frac{V}{\sum_{i=1}^n \alpha_{s,i} \times S_i + \sum_{j=1}^o A_{\text{obj},j}} \\ &= 0,163 \frac{V}{\alpha_1 \times S_1 + \alpha_2 \times S_2 \dots + \alpha_n \times S_n + A_{\text{obj},1} + A_{\text{obj},2} \dots + A_{\text{obj},o}} \\ &= 0,163 \frac{V}{A_1 + \dots + A_n + A_{\text{obj},1} + A_{\text{obj},2} \dots + A_{\text{obj},o}} \end{aligned} \quad 6.6$$

mit den äquivalenten Teilabsorptionsflächen $A_i = \alpha_i \times S_i$ der n absorbierenden Flächen und den insgesamt o absorbierenden Objekten mit der jeweiligen Absorptionsfläche $A_{\text{obj},i}$.

Mit dieser Formel kann schnell und überschlägig eine Aussage zur Nachhallzeit in einem Raum getroffen werden. Im Rahmen eines Entwurfs zur Abschätzung von benötigten Schallabsorberflächen und der damit verbundenen Kosten ist diese Gleichung als ausreichend zu betrachten. Durch das Weglassen der Objektanordnungen im Raum, die häufig auch Absorption in den Raum bringen, sowie der Luftabsorption liegt ein Planer damit in der Regel »auf der sicheren Seite«.

Im Hinblick auf die Wahrnehmbarkeit der Unterschiede der Nachhallzeit wie auch vor dem Hintergrund des Zielbereichs der Nachhallzeit mit einer Toleranz von $\pm 20\%$ nach den Anforderungen für Räume der Gruppe A in der DIN 18041 [52] ist die überschlägige Betrachtung ebenfalls häufig ausreichend. Eine im mathematischen Sinne exakte Prognose der Nachhallzeit eines Raums würde die genaue Kenntnis aller Absorptionswerte und Flächengrößen sowie der gesamten Ausstattung erfordern. Tatsächlich sind für die entsprechenden Oberflächen in der Regel Annahmen und Erfahrungswerte zu treffen, die zu einer Unsicherheit bei der Vorausberechnung der Nachhallzeit führen. Auf diese Grenzen der klassischen Betrachtung nach Sabine wird im Folgenden eingegangen. Zuvor wird die Anwendung der Sabineschen Nachhallformel ausführlich anhand von zwei Beispielen demonstriert.

6.3 Planungsbeispiele

In diesem Abschnitt werden anhand von zwei Beispielen die einzelnen Planungsschritte entsprechend Abbildung 6.1 sowie die Anwendung der Sabineschen Nachhallformel (Gleichung 6.1) dargestellt und erläutert.

Raum der Gruppe A - Besprechungsraum

Schritt 1 – Planungsbeginn

Zunächst ist die Aufgabe zu definieren sowie der architektonische Entwurf hinsichtlich der akustischen Wirksamkeit der Flächen im Raum zu bewerten.

Es soll die Nachhallzeit für einen $8,0\text{ m} \times 9,0\text{ m} \times 3,4\text{ m}$ großen Besprechungsraum bestimmt und mit der entsprechenden Anforderung verglichen werden.

Die Gestaltung des Raums ist wie folgt geplant: Die Bodenfläche hat eine Größe von $8,0 \text{ m} \times 9,0 \text{ m} = 72 \text{ m}^2$. Der Boden soll komplett mit Parkett ausgestattet werden. Die Wände sind verputzt und gestrichen. Neben einer Doppeltür mit einer Fläche von 4 m^2 sind Fenster mit einer Gesamtfläche von 51 m^2 vorhanden. Es sind somit verputzte Wandflächen von 61 m^2 zu berücksichtigen. An der Decke ist ein 52 m^2 großes Deckenfeld mit einem gelochten Gipskarton vorgesehen. Umlaufend, an die Wände anschließend soll ein geschlossener Deckenfries aus glatten, ungelochten Gipskartonplatten mit einer Fläche von 20 m^2 eingebracht werden. Neben einigen Besprechungstischen und Stühlen sind keine weiteren Einrichtungsgegenstände vorgesehen.

Schritt 2 – Zielwerte

Die erforderliche Nachhallzeit ergibt sich aus dem Volumen von $244,8 \text{ m}^3$, gerundet 245 m^3 , sowie der geplanten Nutzung des Raums. Nach den Angaben der DIN 18041 ist ein Besprechungsraum der Nutzungsart A3 »Unterricht / Kommunikation« der Gruppe A zuzuordnen. Nach Gleichung 5.2 folgt entsprechend eine empfohlene Soll-Nachhallzeit von

$$T_{\text{Soll, A3}} = \left(0,32 \log \frac{245 \text{ m}^3}{\text{m}^3} - 0,17 \right) \text{ s} = 0,60 \text{ s} \quad 6.7$$

Die Frequenzabhängigkeit nach Abbildung 5.2 führt somit zwischen 250 Hz und 2000 Hz zu einem Toleranzbereich der frequenzabhängigen Nachhallzeit zwischen 0,48 s und 0,72 s.

Schritt 3 – Berechnung

Für jedes Material ist anhand des Schallabsorptionsgrads und der Fläche zunächst die äquivalente Absorptionsfläche für die sechs Oktaven (125 Hz bis 4 kHz) zu ermitteln. Die Werte des Schallabsorptionsgrads zu den genannten Materialien sind im Anhang 8.1 dieses Buches zu finden. In der Tabelle 6.2 sind die Flächengrößen und die verwendeten Werte des Schallabsorptionsgrads aufgeführt. Zunächst wird von sechs verschiedenen Materialien mit der jeweiligen Flächengröße ausgegangen.

Die Anforderungen nach DIN 18041 beziehen sich auf den mit Personen besetzten Raum. Hierzu wird von 80% der typischen Anzahl der Personen im Raum ausgegangen. Im Beispiel in Tabelle 6.2 wird die Absorptionsfläche pro

Schritt 1 – Planungsbeginn: Raumeigenschaften und Nutzung abstimmen						
Volumen V: 245 m ³		Nutzungsschwerpunkt: Besprechungen				
Schritt 2 – Zielwerte: Soll-Nachhallzeit: T _{Soll, A3} = 0,60 s nach DIN 18041						
Toleranzbereich der frequenzabhängigen Nachhallzeit T nach DIN 18041						
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
Obergrenze	0,87 s	0,72 s	0,72 s	0,72 s	0,72 s	0,72 s
Untergrenze	0,39 s	0,48 s	0,48 s	0,48 s	0,48 s	0,39 s
Schritt 3 – Berechnung:						
Absorptionsfläche Boden – Fläche S ₁ = 72 m ² Parkett						
Parkett mit α ₁	0,15	0,08	0,07	0,06	0,06	0,06
Abs.-Fläche A ₁ = α ₁ × S ₁	10,8 m ²	5,8 m ²	5,0 m ²	4,3 m ²	4,3 m ²	4,3 m ²
Absorptionsflächen Wände – S ₂ = 61 m ² Glattputz; S ₃ = 51 m ² Glas; S ₄ = 4 m ² Tür						
Glattputz mit α ₂	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04	0,06
Abs.-Fläche A ₂ = α ₂ × S ₂	1,2 m ²	1,2 m ²	1,8 m ²	1,8 m ²	2,4 m ²	3,7 m ²
Glas mit α ₃	0,28	0,20	0,11	0,06	0,03	0,02
Abs.-Fläche A ₃ = α ₃ × S ₃	14,3 m ²	10,2 m ²	5,6 m ²	3,1 m ²	1,5 m ²	1,0 m ²
Tür mit α ₄	0,10	0,08	0,06	0,05	0,05	0,05
Abs.-Fläche A ₄ = α ₄ × S ₄	0,4 m ²	0,3 m ²	0,2 m ²	0,2 m ²	0,2 m ²	0,2 m ²
Absorptionsflächen Decke – S ₅ = 52 m ² gelochter Gipskarton; S ₆ = 20 m ² glatter Gipsk.						
gelochter Gipskarton mit α ₅	0,57	0,73	0,67	0,52	0,30	0,18
Abs.-Fläche A ₅ = α ₅ × S ₅	29,6 m ²	38,0 m ²	34,8 m ²	27,0 m ²	15,6 m ²	9,4 m ²
glatter Gipskarton mit α ₆	0,12	0,08	0,04	0,02	0,03	0,00
Abs.-Fläche A ₆ = α ₆ × S ₆	2,4 m ²	1,6 m ²	0,8 m ²	0,4 m ²	0,6 m ²	0,0 m ²
Absorptionsflächen durch Einrichtung						
Einrichtung akustisch nicht wirksam – entfällt						
Absorptionsflächen durch Menschen – N = 10 Personen (inklusive Stühle)						
A _{obj} pro Person	0,15 m ²	0,25 m ²	0,60 m ²	0,95 m ²	1,15 m ²	1,15 m ²
Abs.-Fläche A _{obj} × N	1,5 m ²	2,5 m ²	6,0 m ²	9,5 m ²	11,5 m ²	11,5 m ²
Luftabsorption mit Dämpfungskoeffizient m aus Tab. 6.1 für 20°C, 50 % bis 70 % r.L.						
Luftabsorption: A _{Air} = 4 × m × V	0,10 m ²	0,29 m ²	0,59 m ²	0,98 m ²	1,67 m ²	4,02 m ²
äquiv. Absorptionsfläche A als Summe der Teil-Absorptionsflächen, siehe blaue Werte						
A	60,3 m ²	59,9 m ²	54,8 m ²	47,3 m ²	37,8 m ²	34,1 m ²
Berechnung der Ist-Nachhallzeit nach Gleichung 6.1						
Nachhallzeit T _{Ist} =	0,66 s	0,67 s	0,73 s	0,84 s	1,06 s	1,17 s
Nachhallzeit im Zielbereich?	ok	ok	nein	nein	nein	nein
Anmerkung/Bewertung: Die Nachhallzeit ist bei 125 Hz und 250 Hz innerhalb des Zielbereichs. Von 500 Hz bis 4000 Hz kommt es zu einer Überschreitung.						

Tabelle 6.2 Beispiel zur Berechnung der Nachhallzeit eines neu zu errichtenden Raums – Schritte 1 bis 3

Schritt 3.1 – optimierte Berechnung: Teppichboden als Absorberfläche						
Absorptionsflächen Boden – Fläche $S_1 = 22 \text{ m}^2$ Parkett; $S_7 = 50 \text{ m}^2$ Teppichboden NEU						
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
Parkett mit α_1	0,15	0,08	0,07	0,06	0,06	0,06
Abs.-Fläche $A_1 = \alpha_1 \times S_1$	3,3 m ²	1,8 m ²	1,5 m ²	1,3 m ²	1,3 m ²	1,3 m ²
Teppich (Akustikrücken) mit α_7	0,02	0,10	0,49	0,46	0,44	0,50
Abs.-Fläche $A_7 = \alpha_7 \times S_7$	1,0 m ²	5,0 m ²	24,5 m ²	23,0 m ²	22,0 m ²	25,0 m ²
Summe der Absorptionsflächen $\alpha_n \times S_n$ mit $n = 1 \dots 7$.						
äquiv. Absorptionsfläche A als Summe der Teil-Absorptionsflächen, siehe blaue Werte						
A	53,8 m ²	60,9 m ²	75,8 m ²	67,3 m ²	56,8 m ²	56,1 m ²
Schritt 4 – Finalisierung Ist-Nachhallzeit nach Gleichung 6.1						
Erneute Berechnung der Ist-Nachhallzeit nach Gleichung 6.1						
Nachhallzeit $T_{\text{Ist}} =$	0,74 s	0,66 s	0,53 s	0,60 s	0,70 s	0,71 s
Nachhallzeit im Zielbereich?	ok	ok	ok	ok	ok	ok
Anmerkung/Bewertung: Die zu erwartende Nachhallzeit liegt nun vollständig im Zielbereich. Hinweise zur Positionierung der Schallabsorber und zur Vermeidung von Flatterechos sind in der Dokumentation anzuführen.						

Tabelle 6.3 Beispiel zur Berechnung der Nachhallzeit eines neu zu errichtenden Raums – Schritte 3.1 und 4

Person A_{obj} berücksichtigt. Die Absorptionsfläche aller Personen im Raum erfolgt durch die Multiplikation von A_{obj} mit der Anzahl N der Personen.

Anschließend werden diese Absorptionsflächen in jeder Oktave addiert. Hierbei sollte auch die Luftabsorption nach Tabelle 6.1 berücksichtigt werden, die sich speziell bei hohen Frequenzen bemerkbar macht, auch wenn dies nach dem Hinweis in DIN EN ISO 3382-2 [70] bei kleinen Räumen mit Volumina unter 300 m^3 unterbleiben könnte.

Mit Hilfe der äquivalenten (Gesamt-)Absorptionsfläche A des Raums kann dann anhand der Sabinischen Nachhallformel 6.1 die Nachhallzeit für die sechs Oktaven berechnet werden.

Schritt 3.1 – Modifikation der Planung

Ein Vergleich der berechneten Nachhallzeit in den sechs Oktaven mit der Unter- und Obergrenze des Zielbereichs zeigt, dass es in den Oktaven zwischen 500 Hz und 4000 Hz zu einer Überschreitung des Zielbereichs kommt. Zur Optimierung der Nachhallkurve wird in diesem Beispiel ein Material benötigt, das in

diesen beiden Oktaven über eine hohe Schallabsorption verfügt. Bei Frequenzen unterhalb von 500 Hz ist bereits ausreichend Absorption vorhanden.

Als eine Lösungsmöglichkeit kann das Parkett am Boden gegen einen Teppich ausgetauscht werden, da textile Bodenbeläge in der Regel hochfrequent schallabsorbierend wirken. In Tabelle 6.3 ist als siebte Teilfläche ein 50 m² großer Teppichboden mit einem akustisch wirksamen Unterbau anstelle des Parketts in die Berechnung aufgenommen worden. Es bleiben 22 m² Parkett im Raum vorhanden.

Schritt 4 – Finalisierung

Unter Berücksichtigung dieser Änderung ergibt sich dann eine bei tiefen Frequenzen geringfügig längere Nachhallzeit (Absorptionsgrad des Teppichs geringer als des Parketts). Bei hohen Frequenzen kommt es nicht mehr zu einer Überschreitung des Zielbereichs. Die berechnete Nachhallzeit liegt für alle sechs Oktaven im empfohlenen Zielbereich.

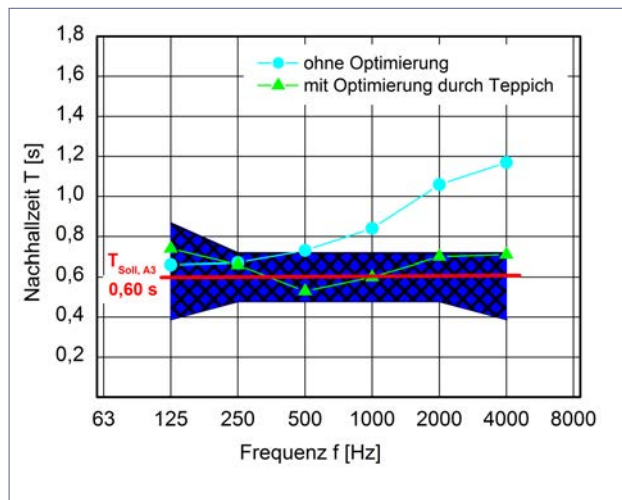


Abbildung 6.4 Zielbereich der Nachhallzeit für den Wert $T_{\text{Soll}, A3} = 0,60 \text{ s}$ im Vergleich mit der Berechnung

In Abbildung 6.4 ist das Ergebnis der Berechnung vor und nach der Optimierung mit dem Teppichboden im Vergleich mit dem Zielbereich der Nachhallzeit für einen empfohlenen Wert von 0,60 s grafisch dargestellt. Die Überschreitung zwischen 500 Hz und 4000 Hz vor der Optimierung ist deutlich

zu erkennen. Nach der Optimierung zeigt die Nachhallkurve nur sehr geringe Schwankungen für die sechs Oktaven.

Schritt 5 – Dokumentation

Die detaillierte Berechnung in den einzelnen Oktaven der Tabelle 6.2 ist für eine ausführliche Dokumentation am Ende des Planungsprozesses kaum geeignet. Häufig werden die entsprechenden Ergebnisse daher in einer verkürzten Form dargestellt. In der Abbildung 6.5 ist eine derartige zusammenfassende Darstellung wiedergegeben. Neben dem Zielbereich der Nachhallzeit sollten die Annahmen zu den in der Berechnung verwendeten Flächengrößen und Materialien aufgeführt werden. In diesem Beispiel sind allgemeine Bezeichnungen verwendet worden. Üblicherweise empfiehlt es sich mit konkreten Produktbeispielen zu agieren, um sowohl den anderen Fachplanern als auch den Architekten deutlich zu machen, mit welchen Materialien und Aufbauten die Planung durchgeführt wurde.

Anmerkungen zu diesem Beispiel

Eine Darstellung der exakten Werte der berechneten Nachhallzeit T_{Ist} kann zu haftungsrechtlichen Diskussionen führen, da aufgrund der getroffenen Annahmen bei der Berechnung wie auch der stets gegebenen Messungenauigkeit Abweichungen zwischen Planung und Messung im fertiggestellten Raum auftreten.

Für dieses Beispiel ist noch darauf hinzuweisen, dass zwar rechnerisch die Empfehlung für die Nachhallzeit nach DIN 18041 weitgehend erreicht wird, aber die Gefahr von Flatterechos zwischen den parallelen und reflektierenden Wänden besteht, da die Absorption fast ausschließlich auf eine Raumrichtung (Decke-Boden) beschränkt ist. Die Hinweise zur Positionierung der Absorber oder auch zu streuenden Elementen wie beispielsweise in Abbildung 5.6 dargestellt sind daher unbedingt zu beachten.

Überschlägige Abschätzung zur Nachhallzeit

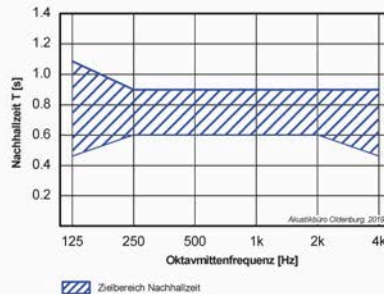
Auftraggeber: Max Mustermann
Mustermannstraße 10
12345 Musterhausen



Akustikbüro Oldenburg

Dr. Christian Nocke
Sophienstr. 7, 26121 Oldenburg
www.akustikbuero-oldenburg.de

Objekt: Planungsbeispiel - Besprechungsraum
Raum: Besprechungsraum
Raumvolumen: 245 m³
empfohlene Nachhallzeit: $T_{\text{sol}} = 0,75 \pm 20\%$, empfohlener Bereich bzw. Frequenzabhängigkeit siehe Grafik

**Annahmen zu Materialien im Raum nach aktuellem Planungsstand:**

Material	Menge
Bodenbelag (Parkett)	ca. 72 m ²
Wand (hart)	ca. 61 m ²
Decke (GK - Lochdecke)	ca. 52 m ²
Decke (Wandfries)	ca. 20 m ²
Fenster (Isolierverglasung, Kasten- und Verbundfenster)	ca. 51 m ²
Tür, Holz, lackiert	ca. 4 m ²

Weiterhin wurde die Luftabsorption berücksichtigt.

Empfehlung zu weiteren Schallabsorbern:

Planungsbeispiel - Besprechungsraum	
Variante 1	<p>62 m² (Bodenbelag) <i>Teppichboden, bis 6mm Florhöhe – niederflorig</i></p> <p>10 m² (Bodenbelag) <i>Parkettfußboden</i></p>

Datum: 01. März 2019

Bearbeiter: M. Sc. Ina Eilers

Abbildung 6.5 Zusammenfassung der Planung in Form eines Datenblatts zur Planung für das aufgezeigte Planungsbeispiel

Raum der Gruppe B - Speiseraum

Analog dem Beispiel für einen Raum der Gruppe A sind die Planungsschritte nach Abbildung 6.1 auch für Räume der Gruppe B durchzuführen. Im Folgenden wird dies am Beispiel eines kleinen Speiseraums in einer Bildungsstätte für Erwachsene dargestellt.

Schritt 1 – Planungsbeginn

Analog dem Vorgehen bei Räumen der Gruppe A ist auch hier zunächst die Aufgabe zu beschreiben sowie die architektonische Planung hinsichtlich der akustischen Wirksamkeit der Flächen im Raum zu bewerten.

Der Raum verfügt über eine Grundfläche von 41 m^2 und eine lichte Raumhöhe von ca. $3,25 \text{ m}$. Hierdurch ergibt sich ein Volumen von ca. 133 m^3 . Die Gestaltung des Raums ist wie folgt geplant: Der Boden soll komplett mit einem harten Bodenbelag aus Linoleum belegt werden. Die Wände sind verputzt und gestrichen. Neben zwei Türen mit einer Gesamtfläche von 11 m^2 sind Fenster mit 7 m^2 vorhanden. Es sind somit verputzte Wandflächen von 65 m^2 zu berücksichtigen. Im mittleren Bereich der Decke wird eine gelochte Gipskartondecke mit einer Flächengröße von 30 m^2 in den Raum eingebracht. Die restlichen 11 m^2 der Deckenfläche sind als ungelochter, glatter Randfries ausgebildet. Als Einrichtungsgegenstände sind Holzgestühl mit Tischen und einige Regale vorgesehen.

Schritt 2 – Zielwerte

Als Zielwert der Planung sind die Orientierungswerte für die Räume der Gruppe B der DIN 18041 [52] zu verwenden. Der Speiseraum ist der Nutzungsart B3 zuzuordnen. Bei einer Raumhöhe von $3,25 \text{ m}$ folgt nach den Vorgaben der DIN 18041 (siehe Tabelle 5.4) ein Wert von

$$\frac{A}{V} \geq \left[3,13 + 4,69 \lg \left(\frac{3,25 \text{ m}}{1 \text{ m}} \right) \right]^{-1} = 0,18 \quad 6.8$$

Der Mindestwert $A/V \geq 0,18$ ist in den vier Oktaven zwischen 250 Hz und 2000 Hz nachzuweisen.

Schritt 3 – Berechnung

Auch hier ist wie bei den Räumen der Gruppe A für jedes Material im Raum anhand des Schallabsorptionsgrads und der Fläche zunächst die äquivalente Absorptionsfläche für die vier Oktaven zu ermitteln. In Tabelle 6.4 sind die Flächengrößen und die verwendeten Absorptionswerte aufgeführt.

Schritt 1 – Planungsbeginn: Raumeigenschaften und Nutzung abstimmen						
Raumhöhe V: 3,25 m		Nutzungsschwerpunkt: Speiseraum für Erwachsene				
Schritt 2 – Zielwerte: Empfehlung: Nutzungsart B3 mit $A/V \geq 0,18$ s nach DIN 18041						
Verhältnis A/V nach DIN 18041						
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
Mindestwerte		0,18	0,18	0,18	0,18	
Schritt 3 – Berechnung:						
Absorptionsfläche Boden – Fläche $S_1 = 41 \text{ m}^2$ Linoleum						
Linoleum mit α_1		0,02	0,03	0,03	0,04	
Abs.-Fläche $A_1 = \alpha_1 \times S_1$		0,82 m ²	1,23 m ²	1,23 m ²	1,64 m ²	
Absorptionsflächen Wände – $S_2 = 65 \text{ m}^2$ Putz; $S_3 = 7 \text{ m}^2$ Glas; $S_4 = 11 \text{ m}^2$ Tür						
Glattputz mit α_2		0,02	0,03	0,03	0,04	
Abs.-Fläche $A_2 = \alpha_2 \times S_2$		1,30 m ²	1,95 m ²	1,95 m ²	2,60 m ²	
Glas mit α_3		0,20	0,11	0,06	0,03	
Abs.-Fläche $A_3 = \alpha_3 \times S_3$		1,40 m ²	0,77 m ²	0,42 m ²	0,21 m ²	
Tür mit α_4		0,08	0,06	0,05	0,05	
Abs.-Fläche $A_5 = \alpha_4 \times S_4$		0,88 m ²	0,66 m ²	0,55 m ²	0,55 m ²	
Absorptionsflächen Decke – $S_5 = 30 \text{ m}^2$ gelochter Gipskarton, $S_6 = 11 \text{ m}^2$ glatter Gips						
gelochter Gipskarton mit α_5		0,74	0,77	0,64	0,58	
Abs.-Fläche $A_5 = \alpha_5 \times S_5$		22,2 m ²	23,2 m ²	19,2 m ²	17,4 m ²	
glatter Gipskarton mit α_6		0,08	0,04	0,02	0,03	
Abs.-Fläche $A_6 = \alpha_6 \times S_6$		0,88 m ²	0,44 m ²	0,22 m ²	0,33 m ²	
Absorptionsflächen durch Einrichtung						
Einrichtung akustisch nicht wirksam – entfällt						
Luftabsorption mit m aus Tab. 6.1 für 20°C, 50 % bis 70 % r.L.						
Luftabsorption: $A_{\text{Air}} = 4 \times m \times V$		0,16 m ²	0,31 m ²	0,53 m ²	0,90 m ²	
äquiv. Absorptionsfläche A als Summe der Teil-Absorptionsflächen, siehe blaue Werte						
Gesamt-Absorptionsfläche A		27,6 m ²	28,6 m ²	24,1 m ²	23,6 m ²	
Schritt 4 – Finalisierung Verhältnis A/V						
Verhältnis A/V		0,21	0,21	0,18	0,18	
A/V Empfehlung erreicht		ja	ja	ja	ja	
Anmerkung/Bewertung: Das A/V Verhältnis liegt vollständig oberhalb des empfohlenen Wertes. Hinweise zur Positionierung der Schallabsorber und zur Vermeidung von Flatterechos sind in der Dokumentation anzuführen.						

Tabelle 6.4 Beispiel zur Berechnung des Verhältnisses A/V eines neu zu errichtenden Speisensaals – Schritte 1 bis 4

Schritt 4 – Finalisierung

Das berechnete A/V-Verhältnis entspricht für alle vier Oktaven dem Orientierungswert bzw. liegt darüber. Somit ist keine weitere Optimierung notwendig.

Anmerkungen zu diesem Beispiel

Die Empfehlungen bzw. Orientierungswerte der DIN 18041 für Räume der Gruppe B beziehen sich auf den jeweiligen Raum ohne Berücksichtigung der Schallabsorption durch Personen. Dies ist im betrachteten Raum aufgrund der im Verhältnis zum Raumvolumen geringen Personenzahl ohne weitere Bedeutung. In größeren Räumen mit eventuell mehreren Hundert Personen kann es sinnvoll sein, auch die Absorption der Personen zu berücksichtigen. Es sollte dann aus Sicht des Fachplaners abgewogen werden, ob auch schon in einem leeren Raum die entsprechenden Orientierungswerte eingehalten werden müssen. Hier ist es in der Regel hilfreich, die realen Nutzungsszenarien aufzugreifen und raumakustisch zu bewerten.

Weiterhin ist zu beachten, dass der betrachtete Raum für die Nutzungsart B3 nach DIN 18041 ausgelegt und berechnet wurde. Sofern es sich um einen Speiseraum in einer Schule, Kindertageseinrichtung (Kindergarten, Kinderkrippe, Hort etc.), einem Krankenhaus oder einer Pflegeeinrichtung handeln würde, wäre der Raum der Nutzungsart B5 zuzuordnen. Hierfür würde sich ein Orientierungswert von

$$\frac{A}{V} \geq \left[1,47 + 4,69 \lg \left(\frac{3,25 \text{ m}}{1 \text{ m}} \right) \right]^{-1} = 0,26$$

nach Tabelle 5.4 ergeben. Entsprechend wäre die Absorptionsfläche A im Raum zu erhöhen. Je nachdem, welche Schallabsorber verwendet werden, kann es hierbei dazu kommen, dass die Deckenfläche allein nicht ausreicht.

6.4 Grenzen und Erweiterungen der klassischen Betrachtung

Die unter Ziffer 6.2 vorgestellte Nachhallformel nach Sabine (siehe auch DIN EN ISO 12354-6 [61]) beruht auf der Annahme eines diffusen Schallfeldes. Ein diffuses Schallfeld wäre im mathematischen Sinne dadurch gekennzeichnet, dass der Schall aus allen Richtungen (isotrop) in gleicher energetischer

Stärke (homogen) auftritt. Es würde den Rahmen dieses Buches sprengen, die Diskussion des Begriffs »diffuses Schallfeld« weiterzuführen. Hier ist zur Vertiefung auf die raumakustische Literatur [32, 33, 120, 127, 137] zu verweisen.

Das »diffuse« Schallfeld kann als idealisierende Vorstellung der theoretischen Akustik eingestuft werden. Trotzdem wird in der Praxis der Raumakustik, aber auch der Bauakustik, sehr häufig die Annahme eines »diffusen« Schallfeldes verwendet. Im Folgenden werden einige Aspekte und Zusammenhänge angeführt, die die Grenzen dieser »diffusen« Schallfeldbetrachtung aufzeigen.

Tiefe Frequenzen

Sobald die Wellenlänge des Schalls und wenigstens eine der Raumabmessungen die gleiche Größenordnung haben, kann es zur Ausbildung von Raumresonanzen bzw. stehenden Wellen, auch Raummoden genannt, kommen. Diese treten bei den sogenannten Eigenfrequenzen des Raums auf. Für einen quaderförmigen Raum mit weitestgehend schallreflektierenden Wänden können diese Eigenfrequenzen, mit f_n abgekürzt, nach der folgenden Formel berechnet werden:

$$f_n = 170 \sqrt{\left(\frac{n_1}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_2}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{n_3}{l_z}\right)^2} \quad 6.9$$

n_1 , n_2 und n_3 bezeichnen einen Zähler, auch Mode genannt, in die jeweilige Raumrichtung. l_x , l_y und l_z sind die Abmessungen des quaderförmigen Raums in m.

In Tabelle 6.5 sind für den im Beispiel unter Ziffer 6.3 vorgestellten Besprechungsraum, entsprechend einem Volumen von 245 m^3 ($8,0 \text{ m} \times 9,0 \text{ m} \times 3,4 \text{ m}$), die ersten zehn Eigenfrequenzen mit den zugehörigen Moden aufgeführt. Die erste Modenfrequenz liegt bei 18,9 Hz. Immer wenn die Raumabmessung einer halben Wellenlänge bzw. einem Vielfachen davon entspricht, kommt es zur Ausbildung einer stehenden Welle im Raum. In diesem Beispiel gehört zur Mode (0,1,0) mit der niedrigsten Frequenz von 18,9 Hz die halbe Wellenlänge der größten Raumabmessung von 9,0 m.

Für andere Raumformen kann die Bestimmung der Eigenfrequenzen in der Regel nicht analytisch erfolgen. Es ist allerdings eine weit verbreitete Fehlvorstellung, dass durch das leichte Schrägstellen einer Wand eine Raummode nicht mehr auftritt. Die Mode tritt ebenso deutlich hervor; sie ist lediglich nicht mehr so leicht zu berechnen.

Eigenfrequenz f_n	Mode (n_1, n_2, n_3)
18,9 Hz ($\lambda = 18,0$ m)	(0,1,0)
21,3 Hz ($\lambda = 16,0$ m)	(1,0,0)
28,4 Hz ($\lambda = 12,0$ m)	(1,1,0)
37,8 Hz ($\lambda = 9,0$ m)	(0,2,0)
42,5 Hz ($\lambda = 8,0$ m)	(2,0,0)
43,3 Hz ($\lambda = 7,8$ m)	(2,2,0)
46,5 Hz ($\lambda = 7,3$ m)	(2,1,0)
50,0 Hz ($\lambda = 6,8$ m)	(0,0,1)
53,4 Hz ($\lambda = 6,4$ m)	(0,1,1)
54,3 Hz ($\lambda = 6,3$ m)	(1,0,1)

Tabelle 6.5 Die ersten zehn Eigenfrequenzen f_n (in Klammern die Wellenlänge λ) in einem Raum mit folgenden Abmessungen: 8,0 m \times 9,0 m \times 3,4 m

Eine Betrachtung der Statistik der Raumresonanzen liefert ein Kriterium für das »diffuse« Schallfeld. Es kann gezeigt werden, dass die Anzahl der Eigenfrequenzen in einem Frequenzintervall (auch Eigenfrequenzdichte genannt) quadratisch mit der Frequenz anwächst. Praktisch bedeutet dies, dass gerade bei kleinen Räumen und tiefen Frequenzen mitunter recht wenige Eigenfrequenzen beispielsweise pro Terz oder auch pro Oktave vorkommen. Dies führt dazu, dass lediglich wenige Frequenzen das Schallfeld im Raum in diesem Frequenzbereich bestimmen.

Die Nachhallzeit T ist allgemein als die Zeitdauer definiert, die die Schallenergiedichte in einem Raum benötigt, bis sie auf den millionsten Teil ihres Anfangswerts abgefallen ist. Dies entspricht einer Abnahme des Schalldruckpegels um 60 dB (vgl. Abschnitt 4.2). Eine statistische Betrachtung der Energie im Raum unter Berücksichtigung der Anzahl der Eigenfrequenzen führt zum Begriff der Grenzfrequenz. Oberhalb der Grenzfrequenz sind ausreichend viele Eigenfrequenzen bzw. Raummoden vorhanden; das Schallfeld ist »diffus« und wird nicht mehr durch einzelne Moden geprägt.

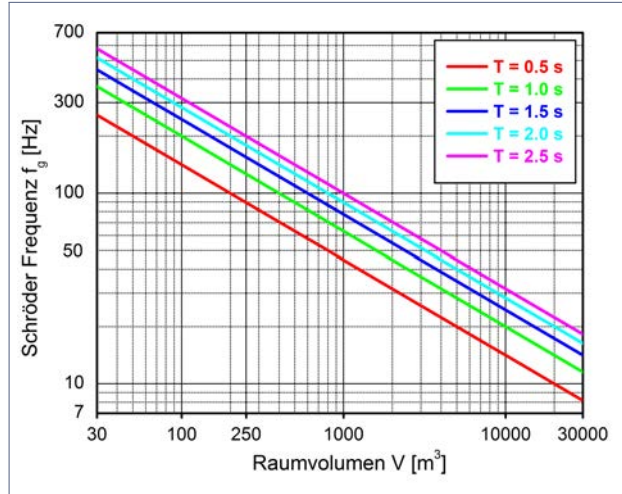
Die Grenzfrequenz f_g hängt ab vom Raumvolumen V und der Nachhallzeit T , es gilt:

$$f_g = 2000 \sqrt{\frac{T}{V}} \quad 6.10$$

In Abbildung 6.6 ist die Grenzfrequenz für verschiedene Werte der Nachhallzeit T in Abhängigkeit vom Volumen dargestellt. Bei einem Raumvolumen von 250 m³ liegt die Grenzfrequenz zwischen 90 Hz für eine Nachhallzeit von

$T = 0,5$ s und 200 Hz für $T = 2,5$ s. Bei größeren Raumvolumina sinkt die Grenzfrequenz auf tiefere Werte.

Abbildung 6.6 Abhängigkeit der Schröder-Frequenz f_g vom Volumen für verschiedene Werte der Nachhallzeit T



Für den erwähnten Raum mit einem Volumen von 245 m^3 und der Zielnachhallzeit von $0,75$ s liegt die Grenzfrequenz bei 110 Hz. Demnach wäre erst ab der 125 Hz-Terz ein ausreichend diffuses Schallfeld vorhanden.

Eine Betrachtung von Raummoden ist bei der Planung von Alltagsräumen wie Arbeits- und Aufenthaltsräumen typischerweise nicht notwendig. Anders kann dies bei Räumen für die Aufnahme oder Bearbeitung von Musik- oder Sprachsignalen sein, die allerdings nicht Gegenstand dieses Buches sind. Zur Planung derartiger Räume werden Frequenzbereiche bis zur unteren Grenze des Hörbereichs betrachtet. Hierbei sollten dann auch Raummoden berücksichtigt werden. Raummoden lassen sich durch raumakustische Maßnahmen mindern, jedoch nicht komplett verhindern. Weitere Details für Räume der Ton- und Bildbearbeitung sind beispielsweise in DIN 15996 [45] »Bild- und Tonbearbeitung in Film-, Video- und Rundfunkbetrieben – Grundsätze und Festlegungen für den Arbeitsplatz« zu finden.

Die Gleichung 6.10 wird auch als »Großraumbedingung« bezeichnet. Erst oberhalb der Grenzfrequenz f_g ist die Raumgröße so, dass das Schallfeld im Raum hinreichend »diffus« ist. Zu Ehren von Manfred R. Schröder (1926–2009) wird die Grenzfrequenz auch als Schröder-Frequenz bezeichnet.

Hallradius

Die Idee des »diffusen« Schallfeldes ist ebenfalls dahingehend zu untersuchen, dass es in einem Raum immer einen Bereich in der Nähe einer Schallquelle gibt, in dem der Einfluss des Raums nicht wirkt bzw. die Reflexionen aus dem Raum noch nicht wirksam sind. Unter der Annahme einer Kugelschallquelle kann der Abstand in einem Raum berechnet werden, bis zu dem der Direktschall überwiegt. Die Entfernung von der Schallquelle, an der die Schallenergie bzw. die Schalldrücke vom Direktschall und dem Pegel des »diffusen« Schallfeldes gleich sind, wird als Hallradius r_H bezeichnet. Der Hallradius hängt lediglich von der äquivalenten Absorptionsfläche A im Raum ab und es gilt allgemein:

$$r_H = \sqrt{\frac{A}{16\pi}} \quad 6.11$$

Mit der invertierten Sabineschen Nachhallformel, Gleichung 6.2, folgt die in der Praxis angewandte Formel für den Hallradius:

$$r_H = 0,057 \sqrt{\frac{V}{T}} \quad 6.12$$

Der Hallradius ist häufig erstaunlich gering. In der Abbildung 6.7 ist der Hallradius für verschiedene Nachhallzeiten zwischen 0,5 s und 2,5 s in Abhängigkeit vom Raumvolumen dargestellt. Aus Abbildung 6.7 kann abgelesen werden, dass bei einem Raumvolumen von 250 m^3 und bei einer Nachhallzeit von 0,5 s der Hallradius bei einer Distanz von 1,27 m liegt. Je länger die Nachhallzeit, desto geringer der Hallradius. Selbst bei einem Raumvolumen von $1\,000 \text{ m}^3$ liegt der Hallradius bei einer für dieses Volumen sehr kurzen Nachhallzeit von 0,5 s nur bei 2,5 m.

Für den erwähnten Besprechungsraum mit einem Volumen von 245 m^3 und der Zielnachhallzeit von 0,75 s liegt der Hallradius bei 1 m.

In der DIN EN ISO 17624 [68] werden neben der Formel für den Hallradius nach Gleichung 6.12 noch weitere Näherungen für den Hallradius bei anderen Raumbedingungen angegeben. Dies betrifft Räume mit vielen Streukörpern, Räume mit geringer Deckenhöhe oder aber langgestreckte Räume.

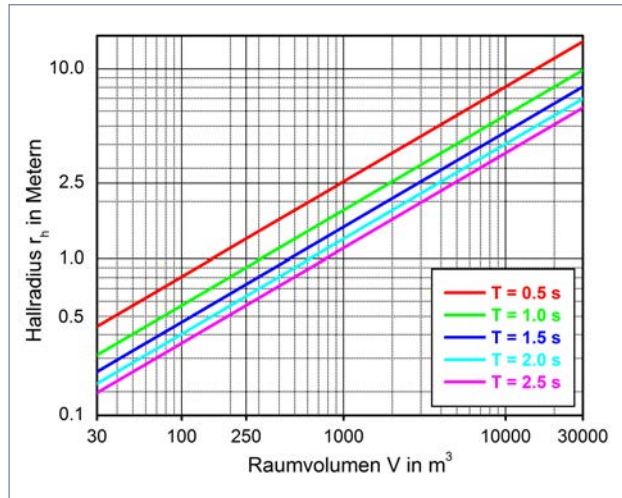


Abbildung 6.7 Hallradius in Abhängigkeit vom Volumen für verschiedene Werte der Nachhallzeit T

Weitere Nachhallformeln

Die theoretische Ableitung der Sabineschen Nachhallformel aus der Betrachtung des zeitlichen Verlaufs der Energiedichte in einem Raum [120, 127] führt zu Aussagen hinsichtlich der Gültigkeit der Gleichung. Es gilt allgemein:

$$T = \frac{24 \ln 10}{c} \frac{V}{A} = \frac{55,26}{c} \frac{V}{A} \quad 6.13$$

mit der Schallgeschwindigkeit c .

Streng genommen gilt der vielfach verwendete Faktor 0,163 bei einer Schallgeschwindigkeit von $c = 340 \text{ m/s}$ entsprechend einer Temperatur von 15°C , siehe Gleichung 2.4. Bei der theoretischen Ableitung der Sabineschen Formel wird angenommen, dass die äquivalente Absorptionsfläche A im Raum klein gegenüber der Summe aller Flächen im Raum ist und dass die Schallenergie im Lauf der Zeit, also bei der Schallausbreitung im Raum, kontinuierlich abnimmt. Eine allgemeinere Betrachtung mit einer nicht kontinuierlichen, sondern stufenweisen Abnahme bei jeder Reflexion im Raum sowie der Berücksichtigung der Dämpfung in der Luft führt zu folgender Formel für die Nachhallzeit:

$$T_{\text{Eyr}} = 0,163 \frac{V}{4mV - S_{\text{ges}} \ln(1 - \bar{\alpha})} \quad 6.14$$

Diese Gleichung wird als »Eyringsche Formel« bezeichnet und wurde im Jahr 1930 erstmalig publiziert [81]. $\bar{\alpha}$ beschreibt den Mittelwert des Absorptionsgrads über alle Flächen im Raum bei einer Frequenz. Wenn der flächengemittelte Absorptionsgrad $\bar{\alpha}$ sehr viel kleiner als 1 wird, d.h. $\bar{\alpha} \ll 1$, dann gilt näherungsweise $\ln(1 - \bar{\alpha}) \approx -\bar{\alpha}$. Die Eyringsche Formel geht damit in die Sabinesche Formel über. Häufig wird für die Gültigkeit der Sabineschen Nachhallformel angegeben, dass der mittlere Absorptionsgrad $\bar{\alpha} \leq 0,25$ sein soll [85].

Es existiert eine Reihe von weiteren Nachhallformeln, die jeweils Ergänzungen und Erweiterungen des Gültigkeitsbereichs der Sabineschen Nachhallformel darstellen. Erwähnung finden als Hinweis zur weiteren Vertiefung die Formeln von Millington [145] aus dem Jahr 1932, Sette [174] aus dem Jahr 1933, Fitzroy [88] aus dem Jahr 1959 oder auch Arau [8] aus dem Jahr 1988. Für unregelmäßig geformte oder mit ungleichmäßiger Absorberverteilung ausgestattete Räume wird im Anhang D des Teils 6 der DIN EN 12354 [61] eine Erweiterung der Sabineschen Nachhallformel beschrieben, die zunächst zwischen den drei Raumrichtungen differenziert und anschließend zu einer Gesamt-Nachhallzeit führt. Hierbei wird ein Streukoeffizient eingeführt, der das Ergebnis der Berechnung beeinflusst. Es wird in der Norm allerdings auch darauf hingewiesen, dass »derzeit nur wenige Angaben zu diesem Koeffizienten zur Verfügung stehen«.

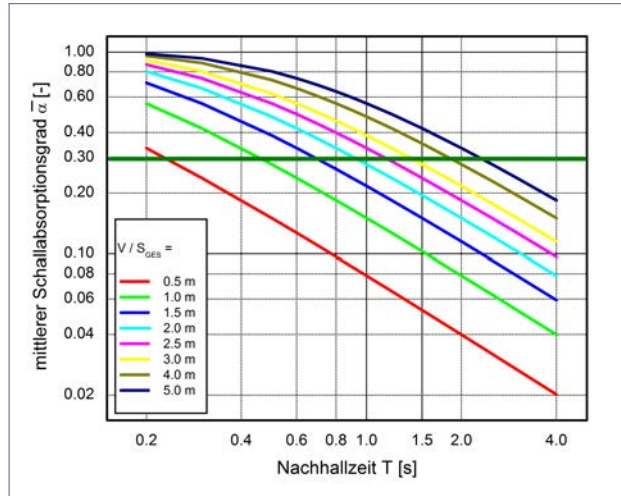
Mittlerer Absorptionsgrad

In diesem Abschnitt wird gezeigt, dass die Kennzeichnung eines Raums durch einen Materialkennwert wie den mittleren Schallabsorptionsgrad $\bar{\alpha}$ problematisch ist. Das Verhältnis von Raumvolumen V zur Gesamtoberfläche S_{ges} kann für die meisten Räume leicht berechnet werden, zumal wenn wie in der TRLV Lärm 3 angeführt nur von sechs Raumbegrenzungsflächen ausgegangen wird.

Unter der Annahme eines diffusen Schallfeldes und der Gültigkeit der Eyringschen Formel, siehe Gleichung 6.14, kann für verschiedene Verhältnisse von Raumvolumen zur Gesamtoberfläche S_{ges} im Raum die Nachhallzeit berechnet werden. In Abbildung 6.8 ist der Zusammenhang zwischen dem mittleren Absorptionsgrad $\bar{\alpha}$ aller Raumbegrenzungsflächen und der Nachhallzeit T

nach Eyring für verschiedene Verhältnisse von Raumvolumen V zur Gesamtoberfläche S_{ges} dargestellt. Ebenfalls markiert ist der Mindestwert von $\bar{\alpha} = 0,3$, der nach den Anforderungen der ASR A3.7 oder auch der TRLV 3 einzuhalten ist.

Abbildung 6.8 Mittlerer Absorptionsgrad $\bar{\alpha}$ in Abhängigkeit von der Nachhallzeit T für verschiedene Verhältnisse von Raumvolumen V zur Gesamtoberfläche des Raums S_{ges}



In der TRLV Lärm 3 wie auch der ASR A3.7 wird zur Berechnung der Nachhallzeit aus dem mittleren Absorptionsgrad die Sabine'sche Nachhallformel vorgeschlagen. Hier besteht ein Widerspruch, da einerseits ein Mindestwert von $\bar{\alpha} = 0,3$ beschrieben wird und andererseits hier die Sabine'sche Formel streng genommen für diesen Bereich des mittleren Absorptionsgrads nicht mehr gilt. Die Vorgaben im Bereich des Arbeitsschutzes sind daher allein vor diesem Hintergrund als sehr überschlägig zu bewerten. Im Sinne der Lärmminimierung und der Anwendungen, für die die arbeitsschutzrechtlichen Regularien gelten, wird hinsichtlich des Arbeitsschutzes sicherlich mehr als ausreichend Absorption in die Räume eingebracht. Es stellt sich allerdings die Frage der Wirtschaftlichkeit einer solchen Überdimensionierung.

6.5 Schallpegel im Raum

Die Vorhersage des Schallpegels in einem Raum ist ein häufig gewünschter Aspekt der raumakustischen Planung. Für Schallquellen mit einem klar definierten Emissions-Schallpegel kann diese Berechnung durchgeführt werden. Sobald jedoch von Menschen durch Kommunikation oder andere Tätigkeiten ausgelöste Geräusche zu berücksichtigen sind, ist eine exakte Vorhersage nicht mehr möglich, da bereits die Sprechlautstärke einer einzelnen Person starken Schwankungen unterliegt. Weiterhin reagiert der Mensch sehr empfindlich auf die akustischen Bedingungen in seiner Hörumwelt. Das Thema der verhaltensbezogenen Anpassung der Sprechlautstärke wird am Ende dieses Abschnitts aufgegriffen.

Die von einem Menschen abgegebene Schallleistung hängt von vielen Faktoren und Einflüssen ab. Häufig wird zur Beschreibung der Sprachlautstärke der Schallpegel in 1 m Abstand vom Mund des Sprechers verwendet. Dieser wird dann als A-bewerteter Schallpegel von Sprache oder kurz auch als Sprachpegel $L_{pA, 1m}$ bezeichnet. In der Tabelle 6.6 sind verschiedene Werte des 1 m-Sprachpegels $L_{pA, 1m}$ angeführt. Diese Tabelle ist ein modifizierter Auszug der Tabelle 5.2.2 aus dem Buch von Lazarus und Kollegen [126]. Dort wird vertiefend ausgeführt, wie diese Beschreibung aus verschiedensten Untersuchungen abgeleitet wurde.

Unterschiede des Sprachpegels ergeben sich nicht nur durch die Sprechweise, sondern hängen auch vom Geschlecht, den Umgebungsgeräuschen und vielen weiteren Faktoren ab. Es ist beispielsweise zu beobachten, dass im privaten Bereich der Sprachpegel häufig um 6 dB niedriger ist als in öffentlichen Umgebungen. Der Sprachpegel von männlichen Sprechern liegt in der Regel um 2 bis 3 dB höher als von weiblichen. Mit der Sprechweise verschiebt sich mitunter auch der Schwerpunkt des Spektrums der Sprache. Bei lauter Sprache verschiebt sich das Spektrum zu höheren Frequenzen. Diese Liste von Einflussfaktoren auf den Sprachpegel und auch die Wechselwirkungen zwischen dem Sprachpegel und der Umgebung können hier nicht wiedergegeben werden. Hierzu ist auf das Buch von Lazarus [126] zu verweisen.

Sprechweise	Sprachpegel	Quelle/Anmerkung
entspannt	$L_{pA, 1m} = 54 \text{ dB}$	DIN 18041, Tabelle C.1 EN ISO 9921, Tabelle A.1 VDI 2569 (1990), Tabelle 2
normal	$L_{pA, 1m} = 60 \text{ dB}$	DIN 18041, Tabelle C.1 EN ISO 9921, Tabelle A.1 VDI 2569 (1990), Tabelle 2
angehoben erhoben	$L_{pA, 1m} = 66 \text{ dB}$	DIN 18041, Tabelle C.1 EN ISO 9921, Tabelle A.1 VDI 2569 (1990), Tabelle 2
laut	$L_{pA, 1m} = 72 \text{ dB}$	DIN 18041, Tabelle C.1 EN ISO 9921, Tabelle A.1
sehr laut	$L_{pA, 1m} = 78 \text{ dB}$	EN ISO 9921, Tabelle A.1

Tabelle 6.6 Angaben zur Sprachlautstärke $L_{pA, 1m}$ in verschiedenen Regelwerken

Um alle diese Einflussfaktoren bei Messungen und auch Prognosen zu minimieren, wird in der Regel von einer kugelförmig abstrahlenden Sprachschallquelle, siehe Abschnitt 2.1, ausgegangen. Weiterhin wurde in der DIN EN ISO 3382, Teil 3 [71] speziell für die Vergleichbarkeit von Großraumbüros ein normierter Sprachpegel eingeführt. Das zugehörige Spektrum ist in Abbildung 4.5 dargestellt. Verhaltensbezogene und auch für den Pegel relevante Faktoren lassen sich nicht prognostizieren. Eine Garantie, dass ein bestimmter Pegel in einem Raum, in dem sich Menschen aufhalten, eingehalten wird, ist daher nicht möglich.

Ist die Stärke einer oder auch mehrerer Schallquellen in einem Raum bekannt, so kann unter der Annahme eines diffusen Schallfeldes im Raum der Schallpegel im Diffusfeld des Raums $L_{p,diff}$ wie folgt berechnet werden:

$$L_{p,diff} = L_w - 10 \log \left(\frac{A}{4} \right) \text{ dB} \quad 6.15$$

Hierbei bezeichnet L_w den Schallleistungspegel der Schallquelle(n) im Raum und A die äquivalente Absorptionsfläche des Raums.

Die Schallausbreitung im Freifeld wird durch die Gleichung 2.3 beschrieben. Die Addition der Gleichungen 2.3 und 6.15 ergibt den Schalldruckpegel in Abhängigkeit vom Abstand r zur (Kugel-)Schallquelle in Räumen mit diffusem Schallfeld:

$$L_p(r) = L_w + 10 \log \left(\frac{1}{4\pi r^2} + \frac{4}{A} \right) \text{ dB} \quad 6.16$$

In Abbildung 6.9 ist der Schallpegel im Raum in Abhängigkeit vom Abstand r von der Quelle für zwei verschiedene Bedämpfungen des Raums, ausgedrückt durch die äquivalente Absorptionsfläche A des Raums, dargestellt. Je stärker der Raum bedämpft ist, desto größer ist der Hallradius und desto niedriger der Diffusfeld-Pegel. Die Minderung des Schalldruckpegels ΔL bei einer Vergrößerung ΔA der äquivalenten Absorptionsfläche A kann wie folgt berechnet werden:

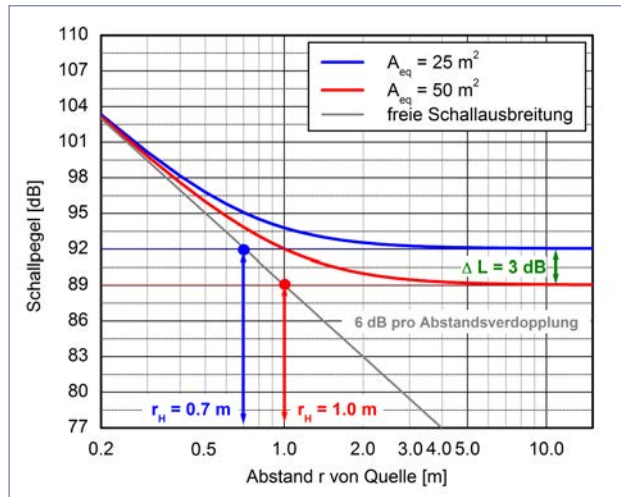
$$\Delta L = \left(10 \log \frac{A + \Delta A}{A} \right) \text{ dB} \quad 6.17$$

Hierbei ist:

- A äquivalente Schallabsorptionsfläche des unbehandelten Raums in m^2
- ΔA zusätzliche äquivalente Schallabsorptionsfläche in m^2
- ΔL die Minderung des Schalldruckpegels im Raum durch Einbringen der zusätzlichen Absorptionsfläche ΔA

Anhand der Gleichung 6.17 ist leicht zu erkennen, dass jeweils eine Verdopplung der äquivalenten Absorptionsfläche A des Raums zu einer Abnahme des Diffusfeld-Pegels um 3 dB führt. Dies ist auch in Abbildung 6.9 skizziert. Eine Verdopplung der äquivalenten Absorptionsfläche A führt im Sinne der Sabine'schen Formel (siehe Gleichung 6.1) zu einer Halbierung der Nachhallzeit. Für eine Pegelminderung von mehr als 3 dB muss die Nachhallzeit mehr als halbiert und dafür die im Raum befindliche Schallabsorptionsfläche verdoppelt werden. In Räumen mit einer sehr langen Nachhallzeit können durch die Installation von Schallabsorbern deutliche Pegelminderungen im Diffusfeld erreicht werden, während in Räumen mit angemessener Nachhallzeit eine deutliche weitere Minderung der Schallpegel nicht allein durch raumakustische Maßnahmen zu erreichen ist.

Abbildung 6.9 Pegel im Raum in Abhängigkeit vom Abstand zur Schallquelle für verschiedene Bedämpfungen des Raums; r_H ist der zugehörige Hallradius.



Diese Zusammenhänge sind in diffusen Schallfeldern und bei stationären Schallquellen zutreffend. Auf diese Weise kann die Pegelminderung von technischen Geräten vorausberechnet werden. Die Schallquelle »Mensch« reagiert u.a. auch mit der Sprachlautstärke auf die raumakustischen Bedingungen.

Lombard-Effekt

Hinsichtlich des Schallpegels in Räumen bei Anwesenheit von miteinander kommunizierenden Menschen ist auf die Wechselwirkung zwischen der raumakustischen Qualität eines Raums und der subjektiven Sprechlautstärke hinzuweisen. Während in einem Konzertsaal oder Opernhaus die Regulierung der Lautstärke im Wesentlichen in den Händen des Dirigenten und der Musiker liegt, ist die Lautstärke in einem Restaurant, Klassenraum oder auch Büroraum eher das Ergebnis vieler und teilweise wenig kontrollierbarer Faktoren: Jeder Sprecher kontrolliert hier seine Sprechlautstärke in der Regel selbst. Dies erfolgt dadurch, dass der Sprecher sich selbst wahrnimmt, die eigene Sprache hört und aus dieser Rückmeldung über die Qualität des Gehörten dann die Sprechweise weitestgehend unbewusst anpasst. Étienne Lombard entdeckte, dass normal hörende Menschen, die über Kopfhörer mit Geräuschen beschallt wurden, die Sprechlautstärke von sich aus anheben. Personen, die einseitig schwerhörig waren, zeigten den Effekt auch dann, wenn lediglich das normal hörende Ohr beschallt wurde.

Als Lombard-Effekt wird die Beobachtung bezeichnet, dass ein Sprecher bei Störgeräuschen seine Sprechlautstärke und gelegentlich auch die Tonlage erhöht. Sofern viele Menschen gemeinsam in einem Raum kommunizieren, wie in einem Klassenraum, einem Mehrpersonenbüro, einem Callcenter oder anderen Räumen mit hohen Kommunikationsaktivitäten, kommt es dadurch zu einem gegenseitigen »Aufschaukeln« und einem deutlichen Anstieg der Gesamtlautstärke.

Eine ausführliche Übersicht zum Lombard-Effekt ist im Buch von Lazarus und Kollegen [126] zu finden. Dort wird angegeben, dass ab einem Störgeräusch von 40 – 50 dB der Sprechpegel um 0,3 – 0,6 dB pro 1 dB Anstieg des Geräuschpegels angehoben wird.

Der Lombard-Effekt wirkt sich umgekehrt bei Lärminderungsmaßnahmen positiv aus. Eine angemessene Bedämpfung eines Raumes mindert den Störgeräuschpegel. Weiterhin wird die Sprachverständlichkeit verbessert. Insgesamt wird unbewusst leiser gesprochen. Die Gesamtlautstärke im Raum bei Anwesenheit auch vieler Personen ist geringer. Dies wird auch als inverser Lombard-Effekt oder »Caféhaus«-Effekt bezeichnet. In Abbildung 6.10 ist

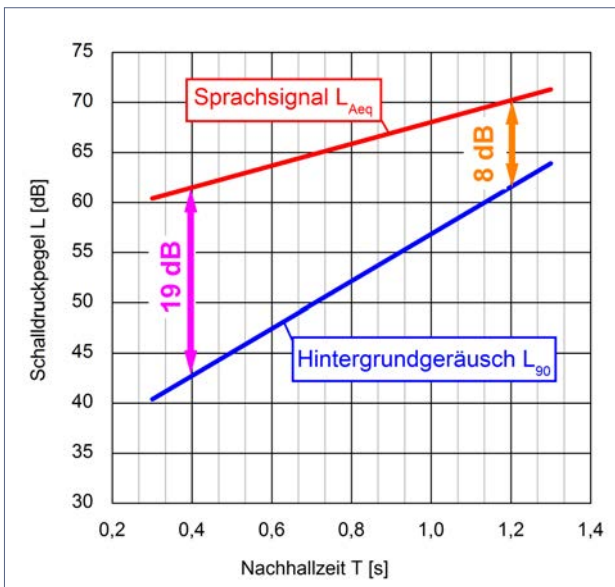


Abbildung 6.10 Pegel des Sprachpegels und des Hintergrundpegels für verschiedene Nachhallwerte im Raum, aus [161]

der Zusammenhang zwischen Sprachpegel (ausgedrückt durch L_{Aeq}), Hintergrundpegel (ausgedrückt durch L_{90}) und Nachhallzeit im Raum aus der sogenannten »Essex«-Studie [24] dargestellt. In der »Essex-Studie« wurden vier Klassenräume mit unterschiedlichen Werten der Nachhallzeit ausgestattet.

6.6 Schallabschirmung

Schallschirme dienen der Minderung des Direktschalls zwischen zwei Positionen und sind in einem Raum im Wesentlichen lokal, also auf kurze Distanzen, wirksam. Die Wirkung eines schallschirmenden Elements, wie einer Stellwand, eines Schrankes oder eines anderen Möbels, wird durch die Abmessungen des Elements, aber auch durch die Position im Raum, bezogen auf die Schallquelle und den Hörort bzw. Empfangspunkt, bestimmt.

Die A-bewertete Einfügungs-Schalldruckpegeldifferenz D_{pA} eines Schirms ist nach DIN EN ISO 17624 [68] »Akustik – Leitfaden für den Schallschutz in Büros und Arbeitsräumen durch Schallschirme« definiert als die Differenz zwischen den A-bewerteten Schalldruckpegeln in Oktav- oder Terzbandbreite ohne und mit Schirm an einem Messpunkt beim Betrieb einer oder auch mehrerer Schallquellen im Raum.

Die folgenden Effekte sind Ursache der Schallminderung eines Schirms:

- Unterbrechung des direkten Schallausbreitungsweges
- teilweise Entkopplung der Schallfelder auf beiden Seiten des Schirms
- Schallabsorption an der Schirmoberfläche.

Für die Unterbrechung oder auch Minderung der direkten Schallausbreitung ist ein Mindestmaß an Schalldämmung für den Aufbau des Schirmes notwendig. Häufig ist schon aus statischen Gründen eine entsprechend massive innere Schicht vorhanden. Schallschirme allein aus einem porösen Material können dagegen über zu geringe Werte der Direkt-Schalldämmung verfügen und sollten durch entsprechende Lagen eines massiven Materials verstärkt werden.

Bei der Kombination mehrerer Schirmelemente oder auch bei modular aufgebauten Schirmen ist die Abdichtung von Fugen wichtig, um die Wirksamkeit zu gewährleisten.

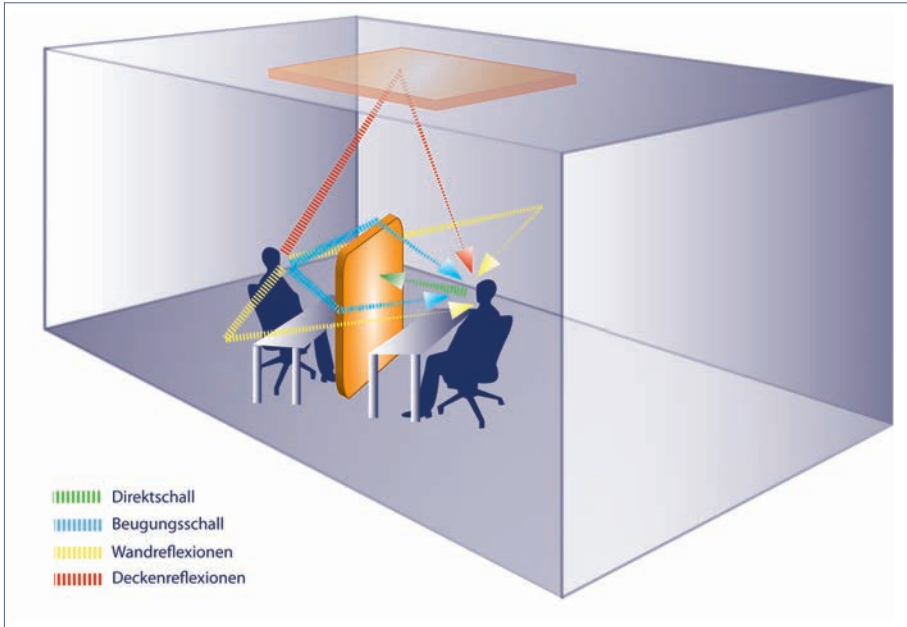


Abbildung 6.11 Verschiedene Schallausbreitungswege an einem Schallschirm im Raum

Das Freifeld-Abschirmmaß D_z des Schirms kann wie folgt berechnet werden:

$$D_z = 10 \log \left(3 + 40 \frac{z}{\lambda} \right) \text{ dB} \quad 6.18$$

Hierbei ist z die Weglängendifferenz in Meter zwischen dem längeren Ausbreitungsweg des Schalls um die geringst wirksame Beugungskante des Schirms und dem direkten Ausbreitungsweg und λ die Wellenlänge des Schalls in Meter der jeweils betrachteten Frequenz f . Bei dem Freifeld-Abschirmmaß D_z wird davon ausgegangen, dass keinerlei reflektierende Flächen in der Nähe des Schirms vorhanden sind. Bei reflektierenden Wänden in der Nähe des Schirms wird in der DIN EN ISO 17624 [68] das reduzierte Abschirmmaß $D_{z,r}$ angegeben, das nach

$$D_{z,r} = 10 \log \left(1 + 20 \frac{z}{\lambda} \right) \text{ dB} \quad 6.19$$

berechnet werden kann.

Das reduzierte Abschirmmaß $D_{z,r}$ ist umso größer,

- je größer die kleinste Abmessung des Schirms ist
- je dichter die Schallquelle an dem Schirm positioniert ist und
- je vollständiger die Schallquelle von dem Schirm umschlossen ist.

Sowohl Formgebung als auch die Schallabsorption der Schirmoberfläche sind für die Schirmwirkung lediglich von geringer Bedeutung. Für die Schirmwirkung ist allerdings relevant, ob sich der Schirm innerhalb des Hallradius einer Schallquelle befindet oder nicht. Die Wirkung eines Schallschirms bezieht sich auf die Minderung des Direktschalls einer Schallquelle. Die Schirmwirkung ist umso besser, je stärker der Direktschall im Vergleich zum Diffusschall im Raum ist. Dies bedeutet, dass sich der Schirm idealerweise dicht an der Quelle und in jedem Fall innerhalb des Hallradius befinden sollte. Für eine Kugelschallquelle in einem Raum mit diffusem Schallfeld ist der Hallradius durch Gleichung 6.12 gegeben.

In Abbildung 6.12 ist die Geometrie eines einfachen Schirms skizziert. Weiterhin ist das Freifeld-Abschirmmaß D_z sowie das reduzierte Abschirmmaß $D_{z,r}$ für die Oktavmittenfrequenzen von 125 Hz bis 4 kHz wie auch der Mittelwert der beiden Abschirmmaße im Bereich zwischen 250 Hz und 1 kHz für diesen Aufbau in der Grafik dargestellt.

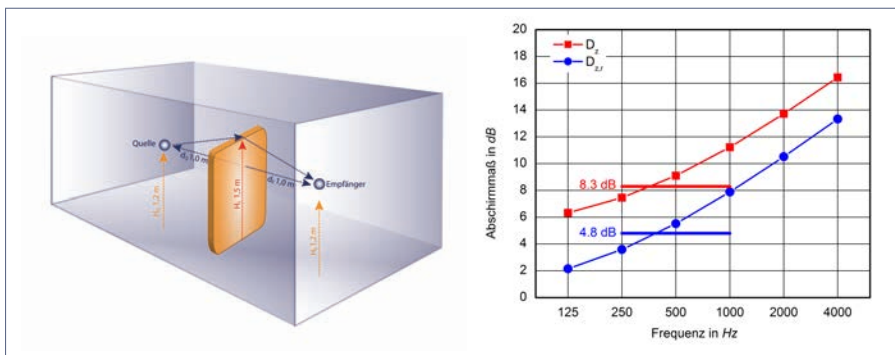


Abbildung 6.12 Skizze zum Aufbau sowie Rechenbeispiel für D_z und $D_{z,r}$ für einen Schirm mit $h_S = 1,5\text{ m}$ bei einem Abstand der Quelle und des Empfängers vom Schirm von $d_Q = d_E = 1,0\text{ m}$ und einer Quell- und Empfängerhöhe von $h_Q = h_E = 1,2\text{ m}$

Die Werte des Freifeld-Abschirmmaßes D_z als auch des reduzierten Abschirmmaßes $D_{z,r}$ werden in einem Raum aufgrund der hier grundsätzlich vorhandenen Reflexionen in der Regel nicht erreicht. Die Wirkung des Schallschirms ist immer in Kombination mit der Schallausbreitung im Raum zu sehen. Für die Anwendung in einem Raum ist deshalb letztlich das Zusammenspiel aus Raumbedämpfung und Abschirmung die entscheidende Größe. Diese Gesamtwirkung eines Schallschirms im realen Einsatzfall wird durch die A-bewertete Einfügungs-Schalldruckpegeldifferenz $D_{p,A}$ beschrieben.

Verhältnis von Schirmhöhe h zu Raumhöhe H	Verhältnis von Abstand s zwischen Schallquelle und Empfänger zu Raumhöhe H		
	< 0,3	0,3 – 1,0	1,0 – 3,0
< 0,3	7 dB	4 dB	–
0,3 – 0,5	10 dB	7 dB	4 dB
> 0,5	–	9 dB	6 dB

Tabelle 6.7 Erfahrungswerte der Einfügungs-Schalldruckpegeldifferenz $D_{p,A}$ von Schallschirmen in flachen Arbeitsräumen nach [68] bzw. [194]

Typische Werte für die Einfügungs-Schalldruckpegeldifferenz aus VDI 2720 Blatt 2 »Schallschutz durch Abschirmung in Räumen« [194] sind in der DIN EN ISO 17624 [68] aufgeführt und in Tabelle 6.7 wiedergegeben. Für andere Abstände und Raumkonstellationen kann das Abschirmmaß nach Gleichung 6.19 überschlägig abgeschätzt werden. Die Erfahrungswerte der Tabelle 6.7 sind anhand von 65 Messungen an 35 Schallschirmen empirisch ermittelt worden [116].

Aus Tabelle 6.7 kann für einen Raum mit einer Raumhöhe $H = 3,0\text{ m}$ abgelesen werden, dass bei einem Schirm mit einer Höhe $h = 1,5\text{ m}$, also bei einem Verhältnis $h/H = 0,5$, der Wert $D_{p,A}$ von 10 dB erreicht wird, wenn der Abstand s zwischen Schallquelle und Empfänger kleiner als 1,0 m ist.

Durch Kurze/Nürnberger [117] wird für Schallschirme die folgende Formel für die Einfügungs-Schalldruckpegeldifferenz D_p angegeben:

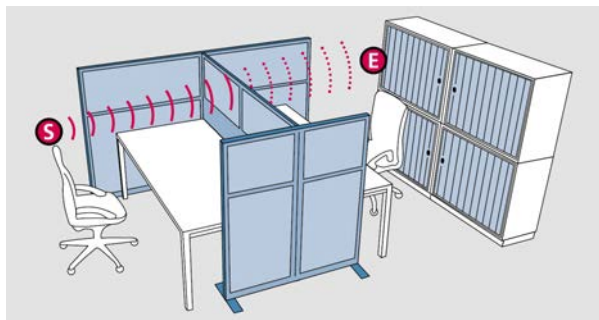
$$D_p = D_E + 10 \log \left(\frac{1 + g}{10^{-R/10} + 10^{-D_{z,r}/10} + g 10^{-(\Delta L_A + \Delta L_K)}} \right) \text{ dB} \quad 6.20$$

Eine weitere Vertiefung und Diskussion dieser Formel soll dem Leser hier erspart bleiben, da einige der angeführten Größen, wie das Entkopplungsmaß

ΔL_K , bestenfalls abgeschätzt werden können. Bei der Kombination mehrerer Schirme oder aber auch verschiedener Schirmhöhen in einem Element ist auch mit dieser Formel keine verlässliche Vorhersage zu treffen. Ebenfalls ist anzumerken, dass lediglich die Pegeländerung durch den Einsatz eines Schallschirms betrachtet wird. Kenngrößen wie der Sprachverständlichkeitsindex STI werden dagegen nicht betrachtet.

Weiterführende Untersuchungen zur Wirkung von Schallschirmen beziehen sich in der Regel auf spezielle Anwendungsfälle. Exemplarische Messungen zum Zusammenhang von Pegelminderung, Sprachverständlichkeit und Schirmgröße bei verschiedenen Nachhallzeiten wurden für einen Hersteller von Büromöbeln durchgeführt [104]. In Abbildung 6.13 ist ein entsprechender Aufbau mit einem u-förmigen Schirm dargestellt. Einige der zugehörigen Messwerte sind in Tabelle 6.8 zusammengefasst.

Abbildung 6.13 Skizze zur Messung der Schirmung für verschiedene Konstellationen [Quelle: Hund Büromöbel [104]]



Aufbau	mittlere Nachhallzeit			
	T = 0,4 s		T = 1,4 s	
	Pegel	STI	Pegel	STI
ohne Schirm	83,4 dB	0,90	83,6 dB	0,80
Schirm wie in Abb. 6.13	78,0 dB	0,86	79,2 dB	0,68

Tabelle 6.8 Messwerte von STI und Pegel bei zwei exemplarischen Aufbauten für verschiedene Nachhallzeiten, Details siehe [104]

Bei kurzer Nachhallzeit ist der Hallradius deutlich größer und entsprechend der Schirm effektiver. Gegenüber der Situation ohne Schallschirmung um den Arbeitsplatz herum werden A-bewertete Pegelminderungen zwischen 4,4 dB bei einer mittleren Nachhallzeit von $T = 0,4$ s und 5,4 dB bei $T = 1,4$ s und

Abnahmen des STI-Werts zwischen 0,12 und 0,04 erzielt. Es bleibt letztlich weiteren Forschungen vorbehalten, den Zusammenhang von Sprachverständlichkeit und Abschirmung zu untersuchen.

Letztlich wird in der der DIN EN ISO 17624 [68] zur Wirksamkeit von Schallschirmen unter realen Einsatzbedingungen auf die DIN EN ISO 11690, Teil 1 [74], verwiesen, wo unter Ziffer 7 die Behandlung von Lärmproblemen in Arbeitsstätten allgemein beschrieben wird. Zur Vorausberechnung der Schallausbreitung in Arbeitsräumen ist nach diesen Hinweisen die DIN EN ISO 11690, Teil 3 [75], anzuwenden, die allerdings auch keine konkreten Methoden und Vorgehensweisen definiert, sondern lediglich Hinweise zur Wahl des Vorgehens beschreibt. Neben den bereits angeführten Diffusfeld-Verfahren werden auch geometrische Verfahren thematisiert. Zu den geometrischen Verfahren zählen die Strahlverfolgungsansätze wie auch sogenannte Spiegelquellenverfahren. Diese werden im folgenden Abschnitt zu den rechnergestützten Verfahren vorgestellt.

Abschließend ist darauf hinzuweisen, dass die pegelmindernde Wirkung von Schallschirmen häufig überschätzt wird. Schon in der Richtlinie VDI 2720 Blatt 2 [194] aus dem Jahr 1983 heißt es:

»Der Einsatz von Schallschirmen in Großraumschulen hat sich nicht bewährt, da durch sie nicht die in DIN 4109 Teil 2 geforderte Schalldämmung für Wände zwischen Unterrichtsräumen zu erreichen ist.«

Die pegelmindernde Wirkung eines Schallschirms kann die schalldämmende Wirkung nicht erreichen. Somit sind die im Marketing ab und an beschriebenen »raumhohen Schallschirme«, die auch als »Wand« bezeichnet werden könnten, bei der Pegelreduktion immer effektiver.

6.7 Rechnergestützte Verfahren - Computersimulation

Neben den klassischen analytischen Methoden zur Berechnung der Nachhallzeit oder auch weiterer raumakustischer Kenngrößen existieren seit geraumer Zeit verschiedene computergestützte Verfahren zur Modellierung der Schallausbreitung in Räumen. Diese raumakustischen Simulationsverfahren basieren auf verschiedenen numerischen Methoden, die im Rahmen dieses Buches nicht vertiefend dargestellt werden können. Hierzu siehe die entsprechende Fachliteratur von Kuttruff, Vorländer oder Weinzierl [120, 119, 197, 199]. Weit verbreitet und mehrfach kommerziell umgesetzt ist die Methode der Strahlverfolgung (engl.: »Ray Tracing«). Hierbei werden Schallstrahlen von einer Quelle in den Raum entsandt. Je nach Methode kommen dann verschiedene Ausbreitungsbetrachtungen zur Anwendung. In der Regel wird anhand einer statistischen Betrachtung und Auswertung der Strahlausbreitung im Raum die Schallausbreitung berechnet.

Eine Reihe von nicht-lokalen raumakustischen Kenngrößen, wie der STI-Wert oder auch der Schallpegel im Raum, können planerisch mit Hilfe entsprechender Rechenprogramme ermittelt werden. Allen raumakustischen Simulationsverfahren ist gemeinsam, dass zunächst ein dreidimensionales Raummodell benötigt wird.

Im Folgenden wird exemplarisch der Ablauf einer raumakustischen Simulationsrechnung am Beispiel eines einfach strukturierten Raums und eines Mehrpersonenbüros dargestellt.

Sofern aus der Architekturplanung dreidimensionale Raummodelle vorhanden sind (wie bei BIM), können diese in der Regel nicht direkt übernommen werden, da zur raumakustischen Simulation stark vereinfachte Geometrien Verwendung finden. Eine automatisierte Geometrie-Vereinfachung architektonischer 3D-Modelle existiert bislang nicht. Daher ist der erste Schritt einer raumakustischen Simulation zunächst die Erstellung eines nach raumakustischen Gesichtspunkten vereinfachten geometrischen Modells.

Abbildung 6.14 zeigt einen quaderförmigen Raum ohne weitere Einrichtungsgegenstände. In diesen Raum wird eine kugelförmig abstrahlende Schallquelle eingebracht, in der Grafik als blaues Kreuz dargestellt. Prinzipiell kann an jedem Punkt im dreidimensionalen Raum eine Auswertung erfolgen. Dies wird

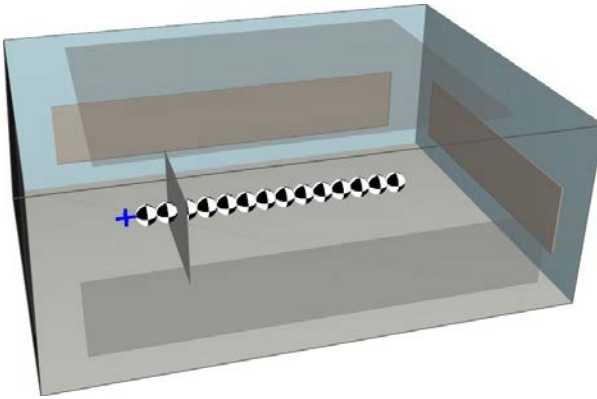


Abbildung 6.14 Modell eines quaderförmigen Raums, (Erläuterung zu den Symbolen im Text)

in der Regel nicht durchgeführt, sondern es werden entweder flächige Darstellungen auf einer Menge von Rasterpunkten im Raum oder einzelne Empfangspunkte zur Analyse des Schallfelds im Raum bzw. der akustischen Kennwerte in diesen Punkten gewählt. Für das nachfolgend verwendete Modell werden insgesamt zehn Empfangspunkte entlang einer Linie angeordnet. Diese Immissionspunkte sind in der Grafik als schwarz-weiße Kugel symbolisiert. Der Abstand zwischen der Schallquelle und zwischen den einzelnen Empfangspunkten beträgt jeweils 0,5 m.

Zunächst werden alle sechs Raumboberflächen mit einem Absorptionsgrad von 1,0 in allen sechs Oktaven zwischen 125 Hz und 4000 Hz belegt. Damit sind keine Reflexionen von Raumbegrenzungsflächen vorhanden; die Schallausbreitung erfolgt wie im Freifeld. Es handelt sich um einen reflexionsfreien Raum. In Abbildung 6.15 ist die Abnahme des Pegels entlang der Empfangspunkte für die sechs Oktaven für den Fall der reflexionsfreien Umgebung dargestellt. In allen Oktaven ist die auch theoretisch zu erwartende Pegelabnahme von 6 dB pro Abstandsverdopplung zu beobachten. Die relativen Unterschiede der Oktavwerte zueinander in Abbildung 6.15 resultieren aus der Definition der Schallquelle, für die ein Sprachspektrum angenommen wurde.

In Abbildung 6.16 ist die Schallausbreitung im Raum flächenhaft als sogenannte Pegelkarte oder Pegelverteilung für 1 000 Hz Oktavmittenfrequenz dargestellt. Klar zu erkennen ist die konzentrische Schallausbreitung ausgehend von der Kugelschallquelle. Zur Berechnung wurde ein Raster mit 0,25 m Quadratraster verwendet, was 1 728 Rasterpunkte in diesem Raum ergibt.

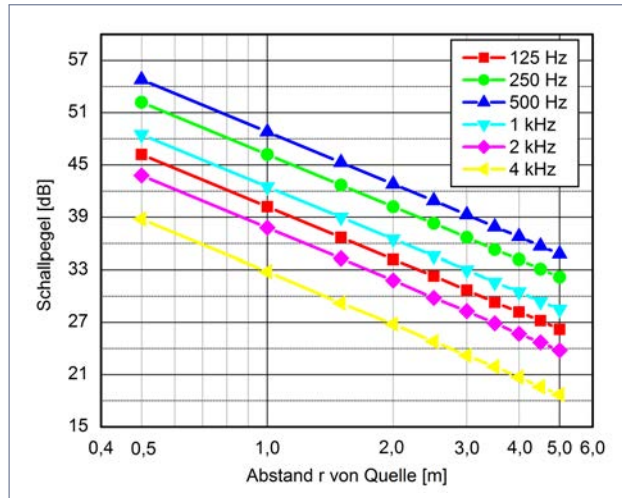


Abbildung 6.15 Pegel im Raum in Abhängigkeit vom Abstand zur Schallquelle

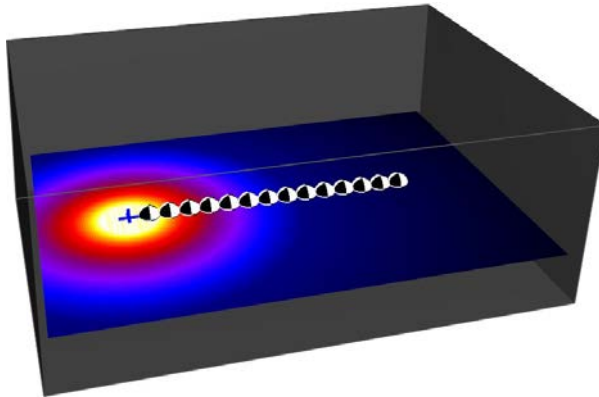


Abbildung 6.16 Schallausbreitung im reflexionsfreien Raum

In der weiteren Betrachtung wurden in diesem Raum realistische Werte des Schallabsorptionsgrads für die Raumbegrenzungsflächen angenommen, um die Schallausbreitung für eine Nachhallzeit von ca. 0,75 s zu berechnen. Die Werte der frequenzabhängigen Nachhallzeit für die verschiedenen Varianten sind in Abbildung 6.17 dargestellt. Der Hallradius ergibt sich nach Gleichung 6.12 zu ca. 1,45 m bei einer Frequenz von 1 000 Hz. Weiterhin wurden drei verschiedene Schirmvarianten in den Raum auf der Ausbreitungsbahn zwischen der Quelle und den Empfangspunkten eingebracht. Der Abstand zwischen der Quelle

und dem Schirm beträgt 1,25 m. Damit liegt der Schirm innerhalb des Hallradius. Neben einem nicht schallabsorbierenden Schallschirm wurde jeweils ein einseitig und ein beidseitig absorbierender Schirm verwendet. In Tabelle 6.9 sind die mit V01 bis V05 bezeichneten Varianten kurz beschrieben.

Variante	Beschreibung
V01	Freifeldraum, kein Schirm
V02	Raum mit Absorbern an Decke und Wand, kein Schirm
V03	Raum mit Absorbern an Decke und Wand, nicht absorbierender Schirm ($\alpha_w = 0,10$)
V04	Raum mit Absorbern an Decke und Wand, einseitig absorbierender Schirm ($\alpha_w = 0,70$ Seite in Richtung Quelle, $\alpha_w = 0,10$ Rückseite)
V05	Raum mit Absorbern an Decke und Wand, beidseitig absorbierender Schirm ($\alpha_w = 0,70$)

Tabelle 6.9 Raumvarianten V01 bis V05 und kurze Beschreibung

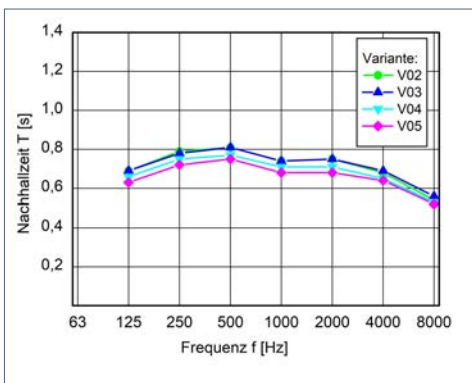


Abbildung 6.17 Nachhallzeit für die Varianten V02 bis V05

Das Ergebnis der Auswertung für die Empfangspunkte auf der Ausbreitungslinie ist in Abbildung 6.18 dargestellt. Die Auswertung erfolgte für die 1000 Hz-Oktave. Anhand der Kurven können einige Vergleiche durchgeführt werden. Zunächst ist der Vergleich zwischen der freien Schallausbreitung (V01) und dem reflektierenden Raum (V02) anzumerken. Diese bereits erwähnte freie Schallausbreitung mit einer Pegelabnahme von 6 dB ist bei der Variante V02 nicht zu beobachten. Erwartungsgemäß kommt es zu einer schwächeren Pegelabnahme. Ab einem Abstand von 5 m nähert sich der Pegel dem auch ana-

lytisch zu erwartenden Wert. Die Schallpegel in größerer Entfernung liegen etwas unterhalb des Wertes für $L_{p,diff}$ nach Gleichung 6.15. Dies ist zu erwarten, da im betrachteten Raum aufgrund der vorhandenen Raumbedämpfung kein ideales diffuses Schallfeld herrscht.

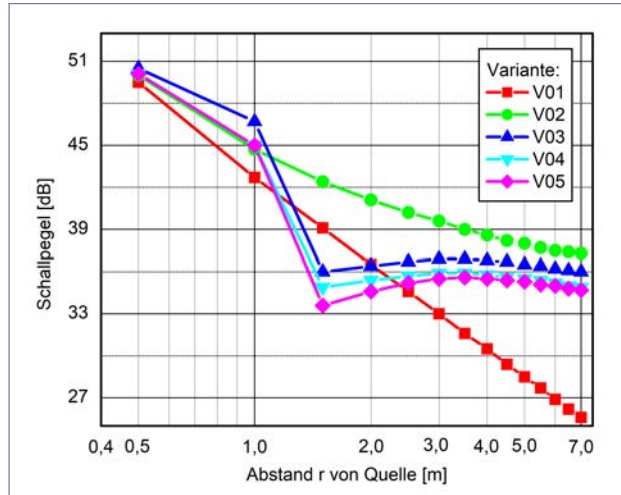


Abbildung 6.18 Pegelabnahme im Raum für die verschiedenen Varianten

Weiterhin ist durch den Vergleich der Varianten ohne und mit nicht absorbierendem, also reflektierendem Schirm (V02 und V03) zu erkennen, dass bei der Position vor dem Schirm der Pegel durch die Reflexion am Schirm erhöht wird. Bei den Varianten V04 und V05 mit absorbierender Schirmoberfläche in Richtung der Schallquelle kommt es zu einer Minderung des Schallpegels (von ca. 2 dB). Unmittelbar hinter dem Schirm, hier bei 1,5 m Abstand zur Quelle, liegt der Pegel selbst bei nicht absorbierendem Schirm (V03) unter dem Wert für die Situation ohne Schirm. Eine noch stärkere Pegelminderung wird bei absorbierenden Schirmoberflächen erreicht. Die Pegelverteilung im Raum für die Varianten V02 bis V05 ist in Abbildung 6.19 dargestellt. Deutlich zu erkennen ist die Wirkung des jeweiligen Schirms auf die Pegelverteilung im Raum.

Anhand des ersten Beispiels wurde das prinzipielle Vorgehen zur raumakustischen Simulation anhand eines einfachen Raums beschrieben. Weiterhin wurde die grobe Übereinstimmung der Simulationsergebnisse mit den Vorhersagen der klassischen raumakustischen Berechnungen gezeigt, die auf der Annahme eines ideal diffusen Schallfelds beruhen. Die Computersimulation ist

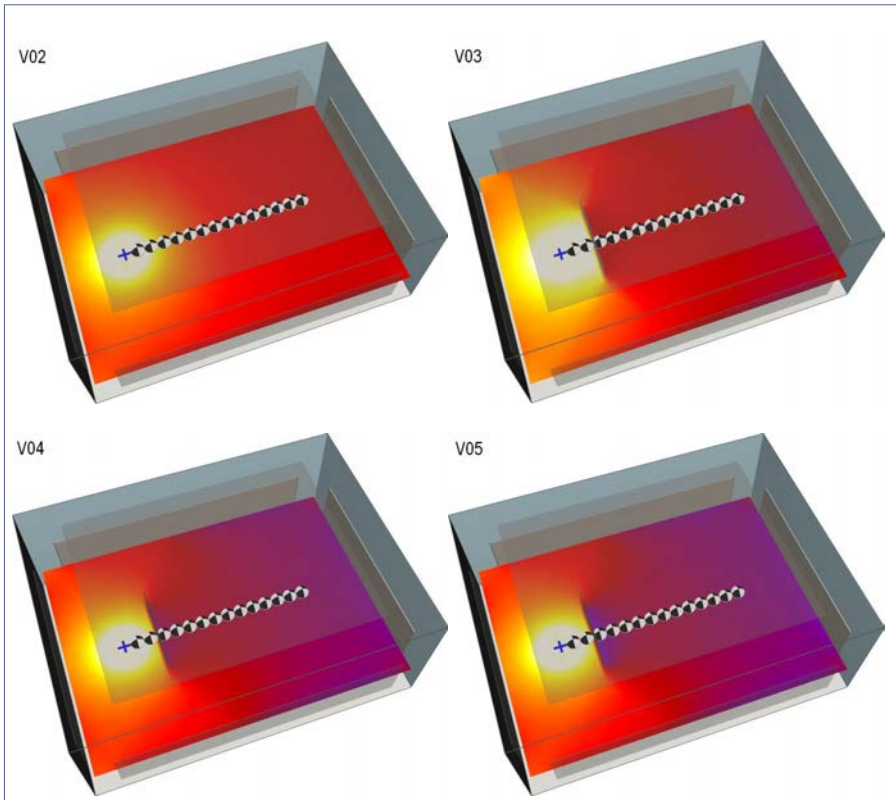


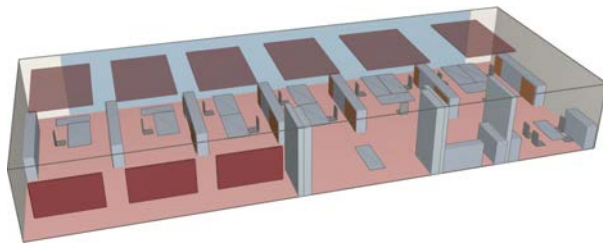
Abbildung 6.19 Akustisches Raummodell mit Darstellung verschiedener Varianten

für beliebige Raumformen und somit auch für andere als diffuse Schallfelder anwendbar. Hierbei können Einrichtungsgegenstände als weitere Flächen bei der Schallausbreitung im Raum berücksichtigt werden.

Der erste und auch wichtigste Schritt zur Computersimulation ist die Erstellung eines nach akustischen Gesichtspunkten gestalteten dreidimensionalen Raummodells. Zur geometrischen Vereinfachung können kleinteilige Strukturen wie Tischbeine, Fensterrahmen oder andere kleinteilige Elemente ignoriert werden. Aus raumakustischer Sicht sind Strukturen mit einer Abmessung von weniger als ca. 30 cm vernachlässigbar, ungefähr entsprechend der Wellenlänge bei 1000 Hz in einer Richtung. Die akustische Wirkung kleiner Strukturen kann in der Modellierung auch berücksichtigt werden, indem z.B. für

eine Tischplatte erhöhte Schallabsorptions- und Streuwerte angenommen werden, anstatt die auf der Tischplatte befindlichen Gegenstände einzeln zu modellieren. Abbildung 6.20 zeigt ein derartiges vereinfachtes 3D-Raummodell. Aus Gründen der Übersichtlichkeit ist die Deckenfläche ausgeblendet. Dargestellt sind allerdings die an der Decke abgehängten Absorberflächen. Die Farbgebung in der gewählten Darstellung repräsentiert den Schallabsorptionsgrad der jeweiligen Fläche: hohe Werte des Absorptionsgrads sind dunkel, niedrige Werte hell. Rötliche Farbtöne geben die Werte für hohe Frequenzen und bläuliche Töne für tiefe Frequenzen wieder. Es ist anzumerken, dass es kein vereinheitlichtes oder gar normiertes Verfahren zur Erstellung derartiger Modelle gibt. Letztlich ist es der Kreativität und Erfahrung des planenden Raumakustikers überlassen, das Raummodell nach akustischen Gesichtspunkten zu gestalten.

Abbildung 6.20 Nach akustischen Gesichtspunkten vereinfachtes Raummodell für ein Mehrpersonenbüro



Nachdem die vereinfachte Geometrie erstellt ist, sind den Flächen im Modell Werte für den frequenzabhängigen Absorptionsgrad α_s zuzuweisen. Dies erfolgt in der Regel in Oktavbandbreite zwischen 125 Hz und 4 kHz bzw. 8 kHz. Einige kommerzielle Programme betrachten einen größeren Frequenzbereich, wobei sich dann die Frage stellt, wie die notwendigen Absorptionswerte bestimmt werden sollen.

Das derart vorbereitete Akustikmodell ermöglicht die Berechnung der Schallausbreitung im Raum. Hierzu kommen verschiedene Algorithmen zum Einsatz, die von den jeweiligen Herstellern der kommerziellen Simulationsprogramme nicht in allen Details offen gelegt werden. Neben der Spiegelquellenmethode werden Strahlverfolgungsalgorithmen und teilweise auch Finite-Elemente-Methoden verwendet. In Abbildung 6.21 sind verschiedene Zeitpunkte der strahlenförmigen Schallausbreitung dargestellt.

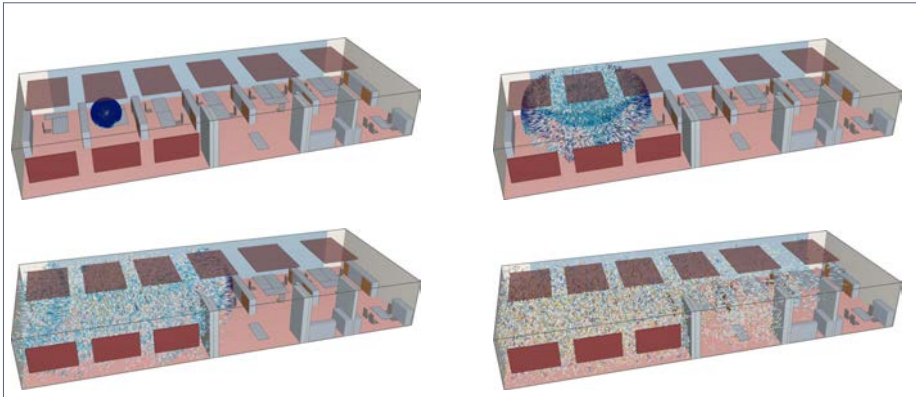
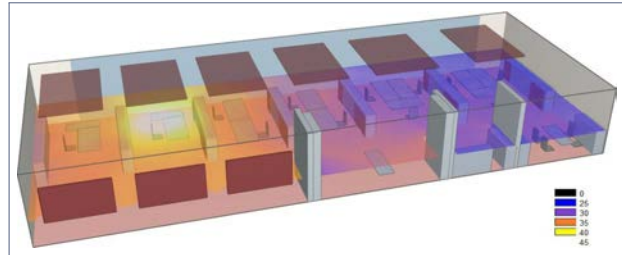


Abbildung 6.21 Akustisches Raummodell mit strahlenförmiger Schallausbreitung zu verschiedenen Zeitpunkten (3 ms, 12 ms, 24 ms und 50 ms)

Die Flächen des Modells werden durch den frequenzabhängigen Absorptionsgrad charakterisiert. Neben dem Absorptionsgrad ist in der Regel auch ein frequenzabhängiger Streuegrad für jede Oberfläche anzugeben. Hierzu liegen in der Regel keine Messwerte für die verwendeten Materialien vor, siehe auch Abschnitt 3.5.3 zur Messung des Streuegrads. Es gibt allerdings Erfahrungswerte bzw. Empfehlungen, die sich in der Praxis in dem Sinne bewährt haben, dass die damit erzielten Rechenergebnisse aus dem 3D-Modell in guter Übereinstimmung mit entsprechenden Messungen sind. Werte für den Streuegrad sind im Buch von Cox und D'Antonio [27] zu finden.

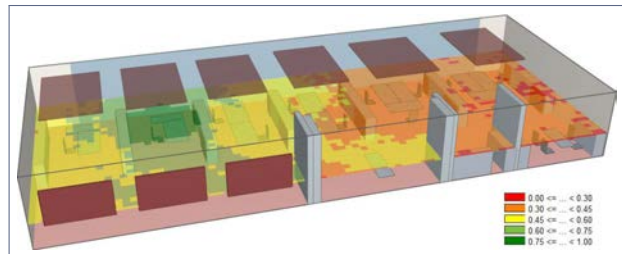
In Abbildung 6.22 ist exemplarisch die räumliche Verteilung des Schallpegels für die 1000 Hz-Oktave dargestellt. Rastergröße und -höhe sind wie die Lage der Quelle im Raum oder auch vieler Quellen frei definierbar. Für die Quellen können dreidimensionale Richtcharakteristiken gewählt werden. Zahlreiche Lautsprecherhersteller stellen entsprechende Datensätze zur Verfügung, die bei der Planung von elektroakustischen Anlagen benötigt werden. Für raumakustische Berechnungen genügt es in der Regel, eine Kugelschallquelle zu verwenden.

Abbildung 6.22 Berechnungsergebnis für den Schalldruckpegel im Raum bei 1 000 Hz



Neben dem Schalldruckpegel im Raum lassen sich auch weitere nicht-lokale Kenngrößen wie der STI-Wert berechnen und darstellen. Abbildung 6.23 zeigt für den exemplarisch gewählten Raum die räumliche Verteilung der Sprachverständlichkeit, ausgedrückt durch den STI. Zur Berechnung des STI ist eine Vorgabe zu dem im Raum herrschenden Schallpegel von Geräuschquellen sowie dem Hintergrundpegel zu treffen.

Abbildung 6.23 Berechnungsergebnis für den STI-Wert im Raum



Mit Hilfe eines raumakustischen Simulationsmodells können verschiedene Materialvarianten, aber auch Änderungen der Geometrie, effizient untersucht werden. Es entstehen allerdings schnell recht umfangreiche Datensätze, deren weitere Verwendung und Interpretation in der Regel entsprechenden Spezialisten vorbehalten bleiben.

STI-Matrix

Für die Analyse von Simulationen können der Schalldruck oder auch andere Kenngrößen auf Karten dargestellt werden. Eine weitergehende Analyse erfolgt durch die Methode der STI-Matrix nach Probst/Böhm [164]. Hierbei wird die Schallausbreitungssimulation sukzessiv von allen Schallquellen zu allen Empfangsorten durchgeführt. Als Beispiel kann ein Restaurant oder ein

Büro betrachtet werden. Jeder Sprecher ist zugleich ein Teil der Störung für einen Teil der anderen Personen im Raum. Im Restaurant oder auch im Büro soll die Kommunikation im näheren Bereich, an einem Tisch oder in einem Team, gut funktionieren, wird aber in weiter entfernten Bereichen dann zur Störung.

Das folgende Beispiel von Wolfgang Probst und Michael Böhm ist mit Dank an die Autoren aus [164] entnommen. An sechs Tischen stehen insgesamt 30 Plätze zur Verfügung. Hieraus ergibt sich, dass bei jedem der 30 Sprecher potentiell 29 Hörer vorhanden sind. Damit gibt es $30 \times 29 = 870$ Sprachübertragungswege bzw. Sprecher-Hörer Beziehungen. In Abbildung 6.24 ist eine schematische Anordnung der 30 Plätze für Sprecher und Hörer dargestellt.

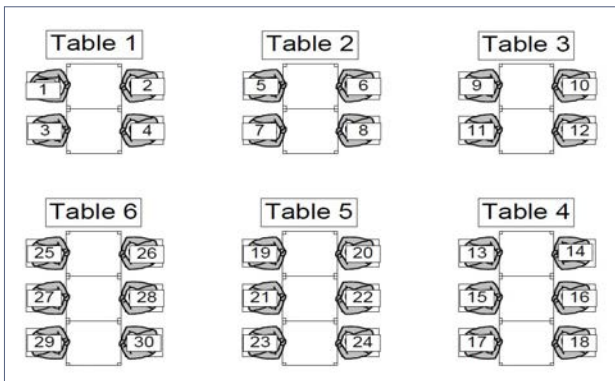
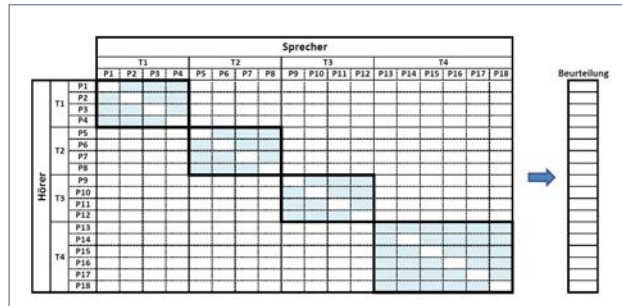


Abbildung 6.24 Skizze zur Nummerierung der Tische und Plätze
[Quelle: [164], DataKustik GmbH]

Diese Sprachübertragungswege, in [164] als »Sprachkanäle« bezeichnet, lassen sich als Matrix darstellen. In Abbildung 6.25 ist aus der Matrix für 30×30 mögliche Übertragungswege ein Auszug von $18 \times 18 = 324$ dargestellt. Für jedes Matrixelement ist der STI-Wert zu bestimmen.

Wie in Abschnitt 4.3 zur Sprachverständlichkeit (dort Abbildung 4.4) gezeigt, hängt der STI-Wert auch vom Hintergrundpegel im Raum ab. Der Hintergrundpegel ergibt sich aus der Anzahl der sprechenden Personen im Raum sowie deren Sprachpegel. Für den Sprachpegel können die Werte nach Tabelle 6.6 einen Anhaltspunkt geben, das Spektrum für Sprache nach DIN EN ISO 3382, Teil 3 [71] (siehe Abbildung 4.5) kann als Vorlage dienen. Ebenso großen Einfluss wie das Spektrum und die Sprachlautstärke auf den Hintergrundpegel hat die Anzahl der sprechenden Personen. In einem Restaurant kann davon ausgegan-

Abbildung 6.25 Matrix zur Beschreibung der Übertragungswege zwischen den Plätzen [Quelle: [164], DataKustik GmbH]



gen werden, dass pro Tisch maximal ein bis zwei Sprecher aktiv sind, während in einem Callcenter angenommen werden kann, dass immer nahezu alle Personen sprechen. Demnach sind situations- und nutzungsbedingt verschiedene Hintergrundpegel in einem Raum zu erwarten. Der Hintergrundpegel ist für die STI-Matrix im ersten Schritt für jeden Hörort zu bestimmen. Schon hier kann es sinnvoll sein, verschiedene Belegungsvarianten eines Raums zu betrachten.

Im nächsten Schritt kann dann in Abhängigkeit von der Raumgestaltung (Nachhall, Abschirmung, Anordnung etc.) der STI-Wert ausgehend von einem Sprecher für alle Hörer bestimmt werden. Dieser Schritt ist für jeden Sprecher zu wiederholen. Im hier schematisch dargestellten Fall sind somit 30 Schallausbreitungsberechnungen für die jeweiligen Sprecher durchzuführen. Sollen noch unterschiedliche Szenarien zur Sprechlautstärke oder Raumgestaltung untersucht werden, erhöht sich der Rechenaufwand. Moderne Rechenverfahren in Kombination mit aktueller Hardware erbringen inzwischen die notwendige Rechnerleistung, sodass auch Untersuchungen zu verschiedenen Varianten möglich sind.

Die Verdichtung der Rechenergebnisse kann mit einer vereinfachten Darstellung erfolgen. In Abbildung 6.26 ist ein farbliches Schema zur Kennzeichnung der Ergebnisse in der Matrix dargestellt. Dieser Bewertungsmaßstab beruht auf den Vorgaben der DIN EN ISO 9921 [78], siehe Tabelle 4.2. Je nach Optimierungsziel können beispielsweise die Ampelfarben verwendet werden. In einem Restaurant sind dann hohe STI-Werte im Nahbereich bzw. an einem Tisch das Ziel, während im Mehrpersonenbüro oder auch Callcenter ein geringer STI-Wert für dicht benachbarte Arbeitsplätze optimal wäre.

Sprecher und Hörer im selben Bereich		
Wertebereich	Qualifizierung	Farbe
$STI \geq 0,6$	gut	grün
$0,45 \leq STI < 0,6$	befriedigend	gelb
$STI < 0,45$	schlecht	rot
Sprecher und Hörer nicht im selben Bereich		
Wertebereich	Qualifizierung	Farbe
$STI \leq 0,2$	gut	grün
$0,2 < STI \leq 0,45$	befriedigend	gelb
$STI > 0,45$	schlecht	rot

Abbildung 6.26 Vorschlag zur farblichen Kennzeichnung von Anforderungen an den STI-Wert

[Quelle: [164], DataKustik GmbH]

Durch die farbliche Kennzeichnung können die STI-Werte der Matrix codiert werden. Damit erhält man sehr schnell einen Überblick des Kommunikationsszenarios im Raum. Für das hier vorgestellte Beispiel mit den vier Tischen (T1 bis T4) in der Teil-Matrix ergibt sich das in Abbildung 6.27 gezeigte Ergebnis.

		Sprecher																	
		T1				T2				T3				T4					
		P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15	P16	P17	P18
Hörer	T1	P1	0,41	0,58	0,29	0,30	0,24	0,29	0,24	0,21	0,21	0,20	0,19	0,20	0,19	0,19	0,18	0,19	0,18
		P2	0,38	0,38	0,35	0,48	0,41	0,28	0,38	0,27	0,22	0,20	0,20	0,19	0,20	0,18	0,20	0,17	0,18
		P3	0,50	0,38	0,38	0,40	0,27	0,22	0,28	0,22	0,20	0,20	0,19	0,19	0,20	0,18	0,19	0,17	0,19
		P4	0,34	0,52	0,37	0,37	0,37	0,26	0,39	0,26	0,21	0,18	0,21	0,18	0,20	0,18	0,19	0,17	0,17
	T2	P5	0,27	0,39	0,27	0,37	0,36	0,53	0,34	0,26	0,22	0,26	0,22	0,23	0,21	0,21	0,20	0,20	0,19
		P6	0,17	0,27	0,17	0,22	0,36	0,32	0,47	0,42	0,31	0,39	0,30	0,28	0,26	0,27	0,24	0,25	0,23
		P7	0,24	0,34	0,26	0,37	0,45	0,33	0,36	0,24	0,21	0,24	0,21	0,23	0,21	0,23	0,20	0,23	0,20
		P8	0,16	0,20	0,17	0,22	0,37	0,51	0,34	0,39	0,30	0,40	0,29	0,28	0,26	0,27	0,25	0,26	0,23
	T3	P9	0,15	0,19	0,16	0,20	0,29	0,40	0,28	0,39	0,40	0,53	0,38	0,30	0,29	0,28	0,27	0,26	0,25
		P10	0,18	0,21	0,19	0,20	0,25	0,32	0,25	0,31	0,41	0,38	0,51	0,33	0,36	0,30	0,33	0,28	0,32
		P11	0,14	0,17	0,15	0,19	0,26	0,37	0,27	0,38	0,46	0,35	0,38	0,35	0,32	0,30	0,30	0,28	0,29
		P12	0,16	0,18	0,17	0,19	0,24	0,30	0,25	0,30	0,39	0,55	0,41	0,34	0,39	0,32	0,35	0,31	0,33
	T4	P13	0,14	0,17	0,16	0,18	0,22	0,27	0,23	0,29	0,29	0,29	0,33	0,30	0,38	0,53	0,56	0,38	0,33
		P14	0,15	0,17	0,17	0,19	0,22	0,28	0,23	0,28	0,33	0,36	0,35	0,40	0,40	0,37	0,50	0,34	0,40
		P15	0,14	0,17	0,16	0,18	0,21	0,26	0,24	0,28	0,27	0,27	0,30	0,29	0,46	0,35	0,40	0,55	0,38
		P16	0,16	0,17	0,17	0,19	0,23	0,27	0,24	0,28	0,31	0,34	0,33	0,36	0,39	0,55	0,42	0,39	0,52
		P17	0,14	0,16	0,16	0,19	0,21	0,26	0,24	0,27	0,26	0,26	0,28	0,28	0,37	0,34	0,48	0,38	0,42
		P18	0,16	0,18	0,17	0,19	0,22	0,26	0,24	0,27	0,30	0,32	0,32	0,35	0,36	0,43	0,41	0,56	0,44

Abbildung 6.27 Platzbezogene Matrix für einen Raumzustand [Quelle: [164], DataKustik GmbH]

An den Tischen (T1 bis T4) ist die Sprachverständlichkeit zwischen den vier bzw. sechs Plätzen mit Werten unter 0,45 eher zu gering, daher rot markiert. Zu den anderen Tischen ist der STI-Wert ausreichend gering, um bei Werten von unter 0,45 (gelb markiert) oder sogar unter 0,20 (grün markiert) die notwendige Vertraulichkeit bzw. Nicht-Verstehbarkeit zu gewährleisten. Auf Basis dieser Betrachtung kann eine platzbezogene Optimierung des Raums vorgenommen werden.

Die Methode der STI-Matrix kann als Verallgemeinerung des Vorgehens mit Messwegen nach DIN EN ISO 3382, Teil 3 [71] angesehen werden. Durch die teilweise willkürliche Anordnung und Auswahl einiger weniger Sprecherpositionen mit zugehörigen Ausbreitungswegen ist das Ergebnis einer Bewertung der Situation in einem Großraumbüro von der Wahl der Positionen und Wege abhängig. Verschiedene Messteams können hier durchaus zu untereinander abweichenden Bewertungen im Sinne der VDI 2569 [193] kommen. Die aktuellen Arbeiten von Kelz [112] und Gumpert [95] zeigen, dass allein schon die Messunsicherheit bei der Klassifizierung zu deutlichen Unterschieden führen kann. Die vorgestellte Methode der STI-Matrix greift die Sprachverständlichkeit zwischen allen möglichen Sprecher-Hörer-Konstellationen auf. Die Messwege nach DIN EN ISO 3382, Teil 3 stellen lediglich eine Teilmenge dieser Gesamtheit dar. Die Methode der STI-Matrix geht dabei über eine Betrachtung der räumlichen Verteilung oder der Abnahme des STI-Werts auf einer Bahn weit hinaus.

Für die computerbasierte Raumakustik-Planung zeigt diese Methode neue Möglichkeiten und Perspektiven auf. Wünschenswert wäre hier die Vereinbarung von einheitlichen Vorgehensweisen und Bewertungsmaßstäben für verschiedene Raumsituationen. Nicht nur die hier beispielhaft erwähnte Situation im Büro oder Mehrpersonenbüro, sondern auch andere Anwendungen in der Raumakustik sind vorstellbar.

Das Hören des eigenen Wortes wäre durch die Werte auf der Diagonalen der Matrix erfasst. In einigen Anwendungen kann auch dies eine sinnvolle Betrachtung darstellen, beispielsweise um die Hörbedingungen in einem Callcenter oder auch einem Orchester zu bewerten. Auch die Betrachtung anderer Kenngrößen als des STI-Wertes wären im Sinne einer Matrix möglich.

Auralisation

Eine für akustische Laien anschauliche Darstellungsform besteht in der Hörbarmachung oder auch Auralisation der entsprechenden Rechenergebnisse. Die raumakustische Simulation mit Software ermöglicht neben der detaillierten Berechnung der Schallausbreitung in Räumen auch die Hörbarmachung bzw. Auralisation der akustischen Bedingungen in den Räumen. Hierzu wird für einzelne Empfangspunkte die Impulsantwort des Raums ausgehend von einer Quellposition berechnet. Wie in Abschnitt 4.2 dargestellt, umfasst die Impulsantwort neben dem Direktschall sämtliche Reflexionen.

Um einen möglichst realistischen Höreindruck zu erzeugen, können binaurale Raumimpulsantworten (kurz BRIR = »binaural room impulse response«) berechnet werden. Weiterhin ermöglichen es einige der am Markt erhältlichen Programmpakete, auch die Übertragungseigenschaften sowohl des Wiedergabegeräts, wie Kopfhörer, Stereoanlage oder auch Surround-System, und auch des menschlichen Kopfes und Ohres zu berücksichtigen. Die Übertragungseigenschaften von Kopf und Ohr werden durch die HRTF (=»head related transfer function«) beschrieben, die für standardisierte Kunstköpfe zur Verfügung stehen, aber auch individualisiert angepasst werden können. Der Detaillierungsgrad der Auralisation ist abzuwägen. Für viele Beratungsprojekte genügt eine Mono-Auralisation. Gerade für Büros und andere Räume des alltäglichen Aufenthalts ist die Richtungsinformation von untergeordneter Bedeutung.

PC-Software kann mittlerweile die Auralisation nahezu in Echtzeit in einem Modell zur Raumakustik-Simulation durchführen, wenn die Schallausbreitung in diesem Modell vorab berechnet wurde. In Abbildung 6.28 ist ein dreidimensionales Raummodell mit einer Pegelkarte dargestellt. Weiterhin sind in dem Raum Immissionspunkte definiert. Für diese Immissionsorte kann direkt ein Klangbeispiel erstellt werden. Die entsprechende Eingabemaske ist in Abbildung 6.29 dargestellt.

Nach Durchführung der Schallausbreitungsberechnung kann für einzelne Hörorte bzw. Immissionspunkte, hier mit IP 01 bis IP 04 bezeichnet, ein Vergleich verschiedener Szenarien durchgeführt werden. Dabei ist es möglich, die Raumgestaltung sowohl hinsichtlich der Absorberausstattung als auch der Möblierung zu verändern. Auf diese Weise kann unmittelbar in den geplanten Raum »hineingehört« werden. Hierbei können verschiedene Ausstattungs-

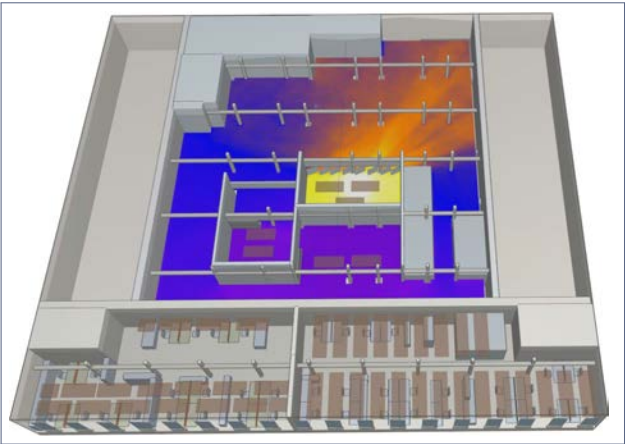


Abbildung 6.28 3D-Modell für direkte Auralisation mit Lärmkarte

varianten des Raums, als auch verschiedene Hörpositionen im Raum direkt miteinander verglichen werden. Die Auralisation liefert neben Nachhall oder Sprachverständlichkeit auch einen Eindruck vom Schalldruckpegel.

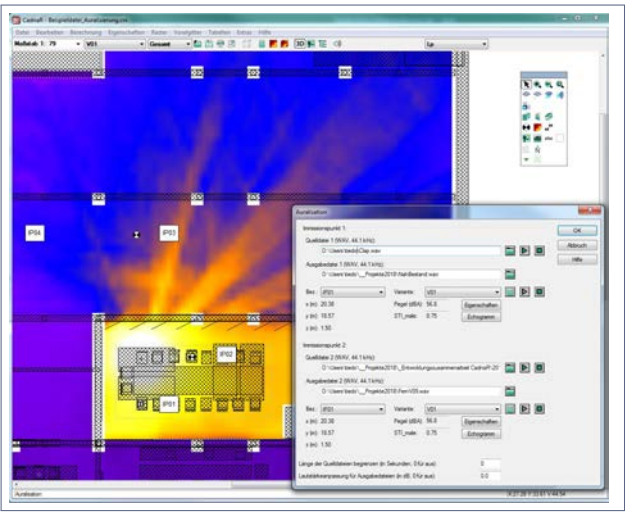


Abbildung 6.29 Aufsicht Modell und Eingabemaske zur Auralisation



Abbildung 6.30 zeigt die Nachhallkurve in einem größeren Raum. Anhand der zugehörigen Hörbeispiele wird der Unterschied zwischen der kurzen, mittleren und langen Nachhallzeit deutlich. Die kurze Nachhallzeit (grüne Kurve) entspricht hierbei der vorgeschlagenen Raumakustikklasse A im Mehrpersonenbüro bzw. der Klasse A im Einzelbüro nach der aktuellen Diskussion zur Neufassung der VDI 2569 [191]. Die lange Nachhallzeit (rote Kurve) gibt eine Situation wieder, die in der Regel zu Beschwerden über die raumakustische Situation im Raum führt. Die mittlere Nachhallzeit (blaue Kurve) liegt mit Werten von knapp unter 1 s gerade unter dem Wert, der häufig zu Beschwerden führt.

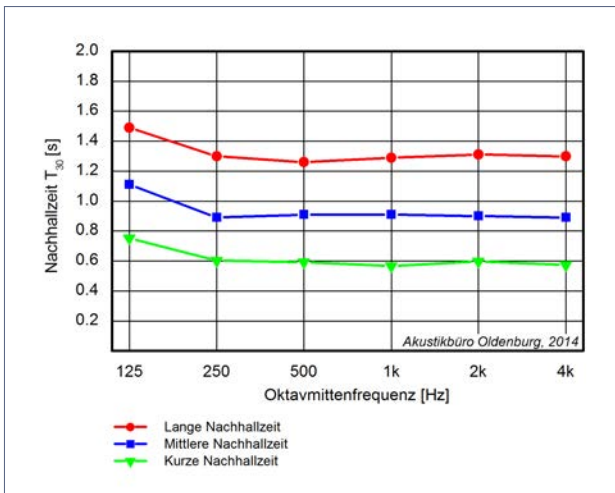


Abbildung 6.30 Verschiedene Nachhallkurven und Auralisation



In Abbildung 6.31 sind die Nachhallkurven zu drei weiteren Hörbeispielen grafisch dargestellt. Es handelt sich um Auralisationen, die in einem kleinen Raum für verschiedene Frequenzverläufe der Nachhallzeit, also Nachhallkurven, erstellt wurden. Die Nachhallkurve mit den höchsten Werten (rote Kurve) entspricht der Grundausstattung des Raums mit einer größeren Glasfläche sowie Möbeln als Tiefenabsorber. Durch das Einbringen eines textilen Bodenbelags wird die Nachhallzeit ab 500 Hz deutlich abgesenkt (grüne Kurve). Ein solches Maximum im mittleren Frequenzbereich ist typisch für viele modern eingerichtete Büroräume mit einem hohen Verglasungsanteil in den Wänden (Absorption tiefer Frequenzen) und ansonsten hochfrequent wirksamen Ab-

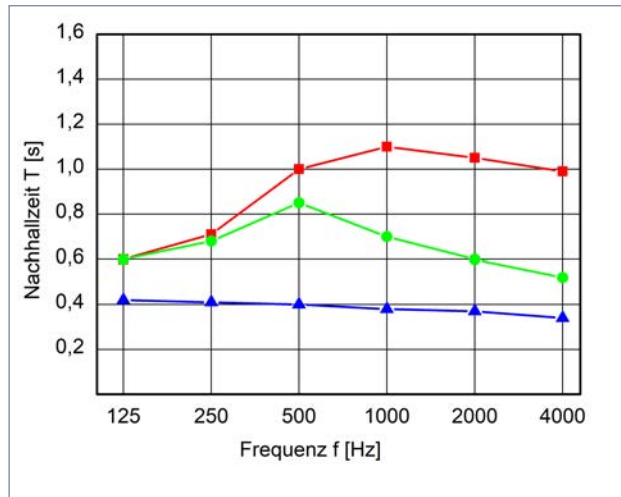


Abbildung 6.31 Verschiedene Nachhallkurven

sorbern wie Standard-Teppichböden. Durch eine abgehangene Decke oder auch eine Ertüchtigung der Möblierung durch akustisch wirksame Fronten kann die Nachhallkurve geglättet werden. Das Beispiel mit Nachhallwerten um 0,4 s ist als Übertreibung zu sehen, um den Effekt deutlich hörbar zu machen.

Weitere Hörbeispiele demonstrieren den Einfluss unterschiedlich hoher Abschirmungen zwischen zwei Arbeitsplätzen bei verschiedenen Abständen zwischen Sender und Empfänger. Während sich durch eine Auralisation Parameter wie Nachhallzeit oder Sprachverständlichkeit auch ungeübten Hörern schnell und eindrucklich vermitteln lassen, ist bei Kenngrößen mit einem Bezug zum absoluten Schallpegel eine gewisse Vorsicht geboten. Streng genommen müssten dann kalibrierte Abhörsysteme verwendet werden.

10

Eine aktuelle Entwicklung zur Auralisation ist eine online verfügbare Software, mit deren Hilfe eine Hörprobe zur Nachhallzeit erstellt werden kann. Ein Screenshot ist in Abbildung 6.32 dargestellt. Nach Eingabe der Raumparameter wird direkt die Nachhallzeit sowohl ohne als auch mit akustischen Maßnahmen grafisch im unteren Teil des Bildschirms dargestellt. Für beide Varianten kann dann auf Knopfdruck online eine Hörprobe erstellt und unmittelbar angehört werden. Hierzu stehen verschiedene Signale wie ein Sprecher,

ein Knall und Musik zur Verfügung. Enthalten ist ebenfalls eine Bewertung der Rechenergebnisse nach den einschlägigen Regelwerken.

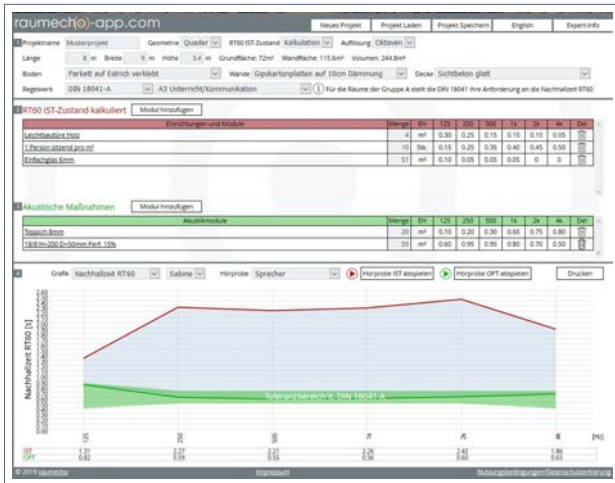


Abbildung 6.32 Online-Software für direkte Auralisation [Quelle: www.raumecho-app.com]

Sämtliche der in diesem Abschnitt vorgestellten Hörbeispiele beziehen sich auf eine unbewegte Sprecher- und Hörerposition. Aktuell erlauben es einige der Programme auch bewegte Szenarien, in der Regel mit bewegten Hörpositionen, zu auralisieren. Der rechentechnische Aufwand solcher Modellierungen ist durchaus mit dem von in der Architektur vermehrt durchgeführten Visualisierungen und Renderings zu vergleichen. Es bleibt abzuwarten, wie sich hier die virtuellen Welten des Hörens und Sehens annähern werden.

6.8 Raumakustik und HOAI

In der aktuellen Honorarordnung für Architekten und Ingenieure [103] (kurz: HOAI 2013) werden in der Anlage 1 zu den Beratungsleistungen im Bereich der Bauphysik unter Ziffer 1.2 die Bereiche Wärmeschutz und Energiebilanzierung, Bauakustik (Schallschutz) und Raumakustik aufgeführt. Die Ziffern 1.2.2 bis 1.2.5 definieren dann genauer, welche Leistungen, Honorarzonen und auch Objekte zur Raumakustik beachtet werden können.

Nach Ziffer 1.2.2 der HOAI 2013 können die Grundleistungen der Bauphysik, also auch der raumakustischen Planung und Überwachung, die folgenden sieben Leistungsphasen umfassen:

1. Grundlagenermittlung
2. Mitwirken bei der Vorplanung
3. Mitwirken bei der Entwurfsplanung
4. Mitwirken bei der Genehmigungsplanung
5. Mitwirken bei der Ausführungsplanung
6. Mitwirken bei der Vorbereitung der Vergabe
7. Mitwirken bei der Vergabe.

Weiterhin werden die Leistungsphase 8 zur Objektüberwachung und Dokumentation wie auch die Leistungsphase 9 zur Objektbetreuung angeführt, für die allerdings keine Honorarvorschläge gegeben werden.

Die Leistungsphasen der HOAI 2013 bedeuten eine Änderung gegenüber der vorherigen Fassung der HOAI aus dem Jahr 2009. Nach Ziffer 1.3.5 der HOAI 2009 konnte die raumakustische Planung und Überwachung lediglich fünf Leistungsphasen umfassen:

1. Erarbeiten des raumakustischen Planungskonzepts,
Festlegen der raumakustischen Anforderungen
2. Erarbeiten des raumakustischen Entwurfs
3. Mitwirken bei der Ausführungsplanung
4. Mitwirken bei der Vorbereitung der Vergabe und bei der Vergabe
5. Mitwirken bei der Überwachung raumakustisch
wichtiger Ausführungsarbeiten.

Die Überwachung raumakustisch wichtiger Ausführungsarbeiten ist offenbar in der HOAI 2013 nicht mehr vorgesehen. Dafür werden die vorausgehenden verschiedenen Phasen feiner untergliedert.

Auch die unter Ziffer 1.3.4 der HOAI 2009 angeführten Aspekte, dass neben der raumakustischen Planung und Überwachung auch akustische Messungen, Modelluntersuchungen und auch die Beratung bei der Planung elektroakustischer Anlagen zu den Leistungen zur Raumakustik gehören können, sind mit der Neufassung der HOAI 2013 entfallen.

Die HOAI 2013 führt ebenfalls nicht mehr an, dass Leistungen für die Raumakustik erbracht werden können, um »Räume mit besonderen Anforderungen an die Raumakustik durch Mitwirkung bei Formgebung, Materialauswahl und Ausstattung ihrem Verwendungszweck akustisch anzupassen« [103]. Die HOAI 2013 führt unter Ziffer 1.2.1, Absatz (4), lediglich aus, dass »die Raumakustik die Beratung zu Räumen mit besonderen raumakustischen Anforderungen umfassen kann«. Was hierunter zu verstehen ist, erschließt sich teilweise aus den Zuordnungen verschiedener Raumtypen zu den insgesamt fünf Honorarzonen, die in Tabelle 6.10 wiedergegeben werden.

	Objekte nach Ziffer 1.2.5 (7) HOAI
Honorarzone I (sehr geringe Planungsanforderungen)	Pausenhallen, Spielhallen, Liege- und Wandelhallen
Honorarzone II (geringe Planungsanforderungen)	Unterrichts-, Vortrags- und Sitzungsräume bis 500 m ³ , nicht teilbare Sporthallen bis 1 000 m ³ , Filmtheater und Kirchen bis 1 000 m ³ , Großraumbüros
Honorarzone III (durchschnittliche Planungsanforderungen)	Unterrichts-, Vortrags- und Sitzungsräume über 500 bis 1 500 m ³ , Filmtheater und Kirchen über 1 000 bis 3 000 m ³ , teilbare Turn- und Sporthallen bis 3 000 m ³
Honorarzone IV (überdurchschnittliche Planungsanforderungen)	Unterrichts-, Vortrags- und Sitzungsräume über 1 500 m ³ , Mehrzweckhallen bis 3 000 m ³ , Filmtheater und Kirchen über 3 000 m ³
Honorarzone V (sehr hohe Planungsanforderungen)	Konzertsäle, Theater, Opernhäuser, Mehrzweckhallen über 3 000 m ³ , Tonaufnahmerräume, Innenräume mit veränderlichen akustischen Eigenschaften, akustische Messräume

Tabelle 6.10 Honorarzonen nach Ziffer 1.2.5 (7) HOAI 2013

Neben einem Vorschlag zur Ermittlung des Honorars werden fünf Honorarzonen beschrieben. Es werden dazu fünf Bewertungsmerkmale zur Zuordnung (siehe Ziffer 1.2.5 (6), HOAI 2013) aufgeführt. Es wird eine allgemeine Anforderung an die Nachhallzeit und deren Einhaltung angeführt und darüber hinaus das Einhalten eines bestimmten Frequenzganges der Nachhallzeit gefordert. Weiterhin folgen dann als Merkmale die Anforderungen an die räumliche und

zeitliche Schallverteilung, die akustische Nutzungsart des Raums sowie eine Veränderbarkeit der akustischen Eigenschaften des Raums.

Es bleibt dem Anwender der HOAI überlassen, die Zuordnung der verschiedenen Raumtypen zu den Honorarzonen zu treffen. In Tabelle 6.10 sind die fünf Honorarzonen mit einer kurzen Beschreibung der Anforderungen sowie der Zuordnung zu der Objektliste nach Ziffer 1.2.5, Absatz (7), der HOAI dargestellt. Die Art und Weise der raumakustischen Planung und Überwachung bleibt naturgemäß dem Planer überlassen. Es sei angemerkt, dass ein Alltagsraum wie eine Schulmensa, die auch zu Theateraufführungen oder gar Konzerten genutzt werden soll, durchaus einen beträchtlichen Planungsaufwand erfordern kann. Ferner sind auch Räume wie Großraumbüros im Sinne der einschlägigen Vorgaben durchaus mit höherem Planungsaufwand als von der HOAI vorgesehen verbunden. Andere wichtige Aspekte wie Schallabschirmung oder Wechselwirkungen mit anderen Planungen, z. B. der raumluftechnischen Anlagen, sind in der HOAI bestenfalls angedeutet.

Inwieweit die Einteilung der HOAI 2013 die heutige Planungs- und Baupraxis angemessen beschreibt, kann an dieser Stelle nicht vertieft werden. Häufig ist zu beobachten, dass die Raumakustik im Planungsablauf bei der Errichtung von Gebäuden gar nicht berücksichtigt wird. Entsprechend trifft der Raumakustiker häufig die Situation an, dass im fertigen Gebäude nach kurzer Zeit die Nutzung beeinträchtigt ist und kurzfristig Lösungen der eigentlich vorhersehbaren Probleme gefunden werden müssen. Dies entspricht dann eher einer Sanierungsberatung eines neuen Bestandsgebäudes als einer Fachplanung zu einem Neubau.

7 Beispiele aus der Beratungspraxis

In diesem Kapitel werden einige Planungen von Räumen beispielhaft erläutert. Es werden verschiedene Räume in unterschiedlichen Gebäudetypen dargestellt. Es handelt sich dabei sowohl um Neuplanungen als auch um bestehende Räume mit akustisch ungünstigen Bedingungen, die auf Grundlage einer Messung optimiert wurden.

In einigen der dargestellten Räume, die raumakustisch unzureichende Bedingungen zeigten, konnten sowohl Messungen im bestehenden Zustand vor der Optimierung als auch nach der Optimierung durchgeführt werden. Anhand dieser Beispiele wird gezeigt, wie genau entsprechende Planungen auf Grundlage einer Messung sind.

Das planerische Vorgehen sowohl für Neubauten als auch für Optimierungen wird am Beispiel von Klassenräumen, Büros, Speiseräumen wie Kantine und Mensa, einer Gaststätte, einer Pausenhalle, Sporthallen und Schwimmbädern beschrieben.

Diese Beispiele dienen dazu, einen Einblick in die Vorgehensweise bei der raumakustischen Planung zu geben. Die häufig gestellte Frage, wie denn ein idealer Raum oder sogar der beste Raum ausgestattet werden muss, kann allein aus raumakustischer Sicht nicht beantwortet werden. Auch in diesem Sinne sind die folgenden Beispiele als exemplarische Ergebnisse einer mit vielen anderen Aspekten abgestimmten Planung zu sehen. Die Beispiele wurden sowohl hinsichtlich der Räume als auch der gewählten Materialien anonymisiert.

Sämtliche Beispiele entstammen realen Beratungsprojekten im Akustikbüro des Autors. Bei den Beispielen wird im Rahmen dieses Buchs auf eine produkt- und herstellernerneutrale Darstellung geachtet. In der Beratungspraxis erfolgen die Planungen bzw. Berechnungen anhand von tatsächlichen Produktdaten. Die Auswahl der Produkte erfolgt in der Regel im Vorfeld der Planung mit den beteiligten Architekten bzw. dem Bauherrn.

7.1 Klassenräume

Bei der raumakustischen Planung von Klassenräumen stellt sich heutzutage die Frage, welches Anforderungsniveau angestrebt werden soll. Nachfolgend werden die Ergebnisse für eine Neuplanung eines Klassenraums mit den Anforderungen der Nutzungsart A3 »Unterricht/Kommunikation« der DIN 18041 (2016) [52] vorgestellt und diskutiert. Weiterhin wird eine zweite Planung für einen Klassenraum mit den Anforderungen für inklusiven Unterricht entsprechend der Nutzungsart A4 »Unterricht/Kommunikation inklusiv« beschrieben. Bei beiden Vorhaben wird davon ausgegangen, dass die Decke weitestgehend nicht mit schallabsorbierenden Aufbauten belegt werden kann, da aus Richtung der thermischen Bauphysik die Anforderung besteht, die Deckenflächen aus Beton als Wärmespeicher zu nutzen. Als energetische Anforderung wird vom Passivhausstandard ausgegangen.

Klassenräume – Neuplanung Beispiel 1

Als erstes Beispiel wird ein Klassenraum mit regulären Anforderungen nach der Nutzungsart A3 »Unterricht/Kommunikation« DIN 18041 (2016) [52] betrachtet. Der Raum verfügt bei Abmessungen von $6,4\text{ m} \times 10,0\text{ m} \times 3,2\text{ m}$ über ein Volumen von 204 m^3 . Hiernach folgt nach Gleichung 5.3 eine Soll-Nachhallzeit $T_{\text{Soll, A3}}$ von $0,55\text{ s}$ (gerundet auf ein Vielfaches von $0,05$). Der anzustrebende Bereich für die Frequenzabhängigkeit der Nachhallzeit nach Abbildung 5.2 ist in der Grafik in Abbildung 7.1 blau schraffiert eingetragen.

In Abbildung 7.1 ist das Ergebnis der Planung zusammenfassend beschrieben. In der oberen Tabelle sind die Annahmen bzw. Vorgaben zu den Materialien sowie den zugehörigen Flächengrößen dargestellt. In der zweiten Tabelle werden Empfehlungen für Schallabsorber im Raum mit kurzen Hinweisen zu deren Positionierung ausgesprochen. Diese Zusammenstellung von schallabsorbierenden Materialien ist das Ergebnis einer Abstimmung mit der Bauherrschaft sowie den planenden Architekten.

Die Berechnung erfolgte wie in den Tabellen 6.2 und 6.3 ausführlich dargelegt. Das Ergebnis der Berechnung ist grafisch im Vergleich mit dem Zielbereich der Nachhallzeit dargestellt. Zu erkennen ist, dass die Werte der Nachhallzeit für alle Frequenzen im Toleranzbereich liegen. Dies ist insofern bemerkenswert, da es sich bei diesem Beispiel um einen Raum mit einer thermisch aktivierten Decke aus Beton handelt.

Überschlägige Abschätzung zur Nachhallzeit

Objekt: Schule Neuplanung, Passivhaus - Standard



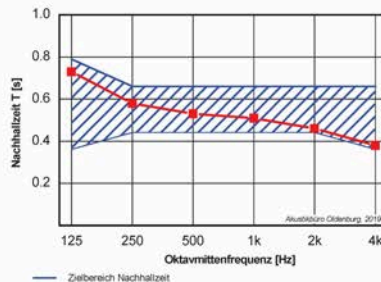
Akustikbüro Oldenburg

Dr. Christian Nocke
Sophienstr. 7
26121 Oldenburg
www.akustikbuero-oldenburg.de

Raum: Klassenraum

Raumvolumen: 204 m³

empfohlene Nachhallzeit: $T_{\text{Soll,A3}} = 0,55 \text{ s} \pm 20\%$, empfohlener Bereich bzw. Frequenzabhängigkeit, siehe Grafik

**Annahmen zu Materialien im Raum nach Planungsstand:**

Material	Menge
Bodenbelag (Linoleum)	ca. 63 m ²
Wand (Leichtbau)	ca. 49 m ²
Decke (hart) – Beton, kernaktiviert	ca. 63 m ²
Fenster (Isolierverglasung, Kasten- und Verbundfenster)	ca. 23 m ²
Tür, Holz, lackiert	ca. 10 m ²

Weiterhin wurde die Luftabsorption, sowie die Anwesenheit von 25 Schülern (80 % Belegung) berücksichtigt.

Empfehlung zu Schallabsorberrn:**Klassenraum, empfohlene Nachhallzeit $T_{\text{Soll,A3}} = 0,55 \text{ s}$**

Materialien	<p>12 m² (Wände) <i>Glaswollplatte</i>, Dicke 40 mm, direkt montiert zzgl.</p> <p>24 m² (Wand – Tafel- und Rückseite) <i>magnesitgebundene Holzwoolplatte</i>, Dicke 25 mm, Wandabstand 100 mm, Mineralwolle 100 mm (Typ DP-5 (50 kg/m³)) zzgl.</p> <p>5 Stück (Anzahl) (Decke) <i>Deckensegel Glaswollplatte (2.400 x 1.200mm)</i>, 200 mm Abhängung</p>
--------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Hinweise/Kommentar:

- 1) Hinweise zur raumakustisch günstigen Positionierung von Wandabsorberrn sind zu beachten.

Datum: 01. Januar 2019

Bearbeiter: M. Sc. Ina Eilers

Abbildung 7.1 Zusammenfassung der Planung für einen kleinen Klassenraum in einer Schule ohne Inklusion und mit Passivhausstandard

Die Decke konnte nach den Forderungen der thermischen Bauphysik komplett als Betonfläche mit fünf untergehängten Absorber-Elementen (»Akustik-segeln«) ausgeführt werden. Entsprechend waren größere Wandflächen schallabsorbierend vorzusehen.

In einer ausführlicheren Dokumentation wäre es möglich und sinnvoll, dass die verwendeten Absorptionsgrade der jeweiligen Materialien aufgeführt werden. Anhand der Angaben in dem in Abbildung 7.1 dargestellten Dokument kann die durchgeführte Berechnung jedoch grob nachvollzogen werden. Die Darstellung der Berechnungsgrundlagen wie auch des Ergebnisses in Abbildung 7.1 ist aus diesem Grund mit »Überschlägige Abschätzung zur Nachhallzeit« überschrieben.

Klassenräume – Neuplanung Beispiel 2

Im zweiten Beispiel wird ein Klassenraum betrachtet, der nach den Anforderungen der Nutzungsart A4 »Unterricht/Kommunikation inklusiv« der DIN 18041 (2016) [52] geplant wird. Im Sinne des barrierefreien Bauens wären heutzutage alle Klassenräume nach diesen Anforderungen zu errichten. Die Planungspraxis sieht allerdings anders aus, da sich viele Bauherren entscheiden, nicht jeweils alle Räume eines Schulgebäudes auch auditiv inklusiv herzurichten.

Bei Abmessungen von $8,4 \text{ m} \times 7,3 \text{ m} \times 3,0 \text{ m}$ ergibt sich ein Raumvolumen von $V = 183 \text{ m}^3$. Auf ein Vielfaches von 0,05 gerundet ergibt sich die Soll-Nachhallzeit nach Gleichung 5.4 zu $T_{\text{Soll,A4}} = 0,45 \text{ s}$. Der zugehörige frequenzabhängige Toleranzbereich für die Nachhallzeit ist in der Grafik in Abbildung 7.2 dargestellt.

Analog zu dem unter Ziffer 6.3 beschriebenen Rechengang ergibt sich bei Verwendung der beschriebenen Materialien und zugehörigen Flächengrößen die zu erwartende Nachhallkurve aus der Grafik. In diesem Beispiel sind zwei Planungsvarianten mit verschiedenen Schallabsorberaufbauten dargestellt. Beide Varianten sind aus raumakustischer Sicht gleichwertig, auch wenn es rein rechnerisch zu geringen Differenzen zwischen den beiden Nachhallkurven kommt. Aus Sicht der thermischen Bauphysik wurde zunächst der Wunsch geäußert, dass ungefähr die Hälfte der Deckenfläche, hier also gut 30 m^2 , als Wärmespeichermasse aus Beton herzustellen sei. Im Rahmen der intensiven Abstimmung mit den Architekten konnte dieser nicht-schallabsorbierende Deckenanteil auf gut 20 % reduziert werden.

Überschlägige Abschätzung zur Nachhallzeit

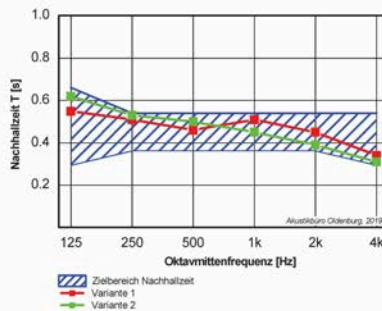
Auftraggeber : Amt für Hochbau, Bereich Schulbau
 Straße 1
 11111 Beispielstadt



Akustikbüro Oldenburg

Dr. Christian Nocke
 Sophienstraße 7, 26121 Oldenburg
 www.akustikbuero-oldenburg.de

Objekt: Schule Neuplanung, Passivhaus-Standard
 Raum: Klassenraum
 Raumvolumen: 183 m³
 empfohlene Nachhallzeit: $T_{\text{sol,A4}} = 0,45 \text{ s} \pm 20\%$, empfohlener Bereich bzw. Frequenzabhängigkeit siehe Grafik

**Annahmen zu Materialien im Raum nach Planungsstand:**

Material	Menge
Bodenbelag (Linoleum)	ca. 61 m ²
Wand (hart)	ca. 58 m ²
Decke (hart) – Beton – Kernaktiviert	ca. 61 m ²
Fenster (Isolierverglasung, Kasten- und Verbundfenster)	ca. 22 m ²
Tür, Holz, lackiert	ca. 4 m ²

Weiterhin wurde die Luftabsorption, sowie die Anwesenheit von Schülern (80 % Belegung) berücksichtigt.

Empfehlung zu Schallabsorbem:**Klassenraum, empfohlene Nachhallzeit $T_{\text{sol,A4}} = 0,45 \text{ s}$**

Variante 1	50 m ² (Decke) <i>magnesitgebundene Holzwolplatte</i> , Dicke 35 mm, Abhängung 265 mm, 40 mm Mineralwolle zzgl. 15 m ² (Wände) <i>magnesitgebundene Holzwolplatte</i> , Dicke 25 mm, Abstand 30 mm, 30 mm Mineralwolle
Variante 2	48 m ² (Decke) <i>Mineralwoll-Perlite-Platten</i> , Dicke 19 mm, Abhängung 300 mm zzgl. 13 m ² (Wände) <i>Steinwollplatten</i> , Dicke 80 mm, direkt montiert

Hinweise / Kommentar:

- Die Varianten 1 und 2 führen dazu, dass die mittlere Nachhallzeit zwischen 125 Hz und 4000 Hz im empfohlenen Bereich liegt. Gleichwohl ergibt sich bei allen Varianten ein verbleibender leichter Anstieg der Nachhallzeit zu tiefen Frequenzen, was aus raumakustischer Sicht jedoch akzeptabel ist.

Datum: 01. März 2019

Bearbeiter: M. Sc. Ina Eilers

Abbildung 7.2 Zusammenfassung der Planung für einen Klassenraum in einer Schule mit Inklusion und Passivhausstandard

Klassenzimmer – Optimierung im Bestand

Im Rahmen eines Forschungsprojekts mit der Universität Oldenburg [169] wurden Klassenzimmer einer Grundschule akustisch optimiert. Vor und nach der Änderung der Räume wurden die Schülerinnen und Schüler zur subjektiven Wahrnehmung der Raumakustik befragt. Die ausführliche Dokumentation dieser Untersuchungen ist im Tagungsband zum 9. Oldenburger Symposium zur Psychologischen Akustik zu finden [169]. Im Folgenden wird das Vorgehen zur raumakustischen Optimierung der Klassenzimmer beschrieben.

Der hier vorgestellte Raum verfügt bei einer Grundfläche von 65 m^2 und einer Raumhöhe von $3,5 \text{ m}$ über ein Volumen von $V = 230 \text{ m}^3$. Aufgrund von Hinweisen auf eine raumakustisch ungünstige Situation wurde die frequenzabhängige Nachhallzeit gemessen. Das Ergebnis ist in Abbildung 7.3 dargestellt. Weiterhin ist der Toleranzbereich der frequenzabhängigen Nachhallzeit um die Soll-Nachhallzeit $T_{\text{SOLL}, A5} = 0,60 \text{ s}$ im Vergleich mit dem Messergebnis vor und nach der Optimierung sowie dem Ergebnis der raumakustischen Planung eingetragen.

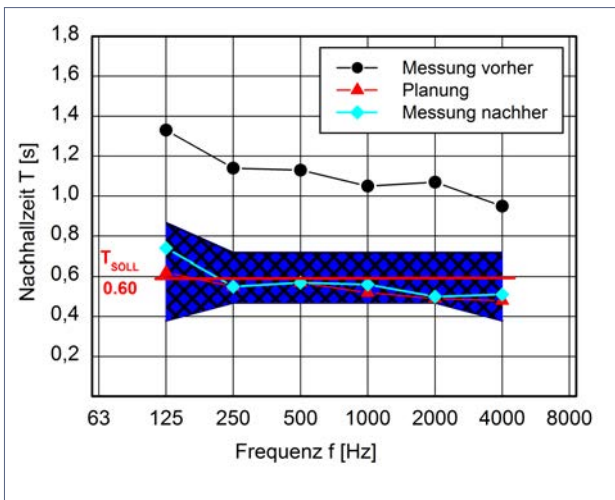


Abbildung 7.3 Zielbereich der Nachhallzeit für den Wert $T_{\text{SOLL}} = 0,60 \text{ s}$ im Vergleich mit der Messung vor und nach der Optimierung sowie dem Ergebnis der Planung

Der Mittelwert der Nachhallzeit im Sprachbereich (250 Hz bis 2000 Hz) lag vor der Optimierung bei einem Wert von $1,10 \text{ s}$ und nachher bei $0,55 \text{ s}$. Um diese Absenkung der Nachhallzeit zu erreichen, wurden in den Raum eine

vollflächige schallabsorbierende Decke mit einer Abhängenhöhe von 300 mm und dazu eine Fläche von 14 m^2 mit 80 mm starken Steinwolle-Platten in den oberen Wandbereichen eingebracht. Im Vergleich zwischen den Werten der Planung und den nach der Optimierung gemessenen Nachhallwerten in den Oktaven zeigt sich lediglich bei 125 Hz eine nennenswerte Abweichung.

In Abbildung 7.4 ist die Situation des Raums ohne Akustikmaßnahmen an der Decke und den Wänden gezeigt. Die schallabsorbierende Bekleidung an der Decke und in den oberen Wandbereichen ist in Abbildung 7.5 zu erkennen.

Abbildung 7.4 Klassenraum vor der Optimierung ohne Schallabsorber an Decke und Wänden



Abbildung 7.5 Klassenraum nach der Optimierung mit vollflächiger Akustikdecke sowie Teilbelegung in den oberen Wandbereichen



7.2 Büroräume

Einzelbüro – Optimierung im Bestand

In diesem Abschnitt wird die Optimierung eines Einzelbüros auf Basis einer Messung erläutert. Zunächst mag es erstaunen, dass in einem Einzelbüro die raumakustischen Bedingungen als so störend und belästigend empfunden werden, dass ein Akustiker zu einer Messung und Beratung hinzugezogen wird. Anhand des Messergebnisses in dem 26 m² großen und 2,75 m hohen Raum wurde allerdings schnell klar, dass die subjektiven Beschwerden mehr als berechtigt waren.

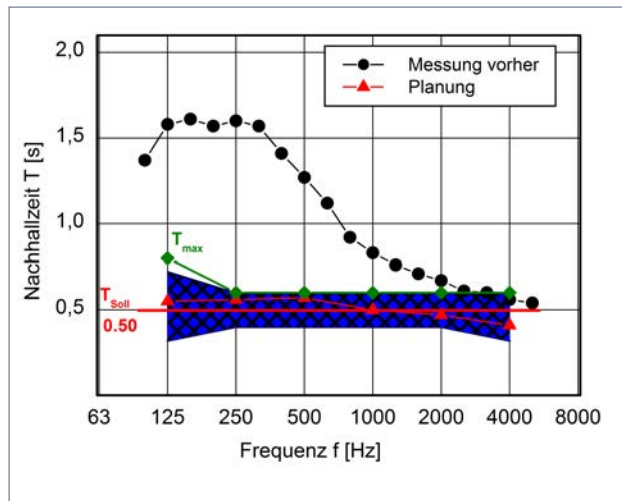
Abbildung 7.6 zeigt den beschriebenen Raum. Neben einem Teppichboden sind keinerlei schallabsorbierende Materialien vorhanden. Eine glatte Gipskartondecke sowie geputzte Wände, akustisch weitgehend unwirksame Rollos und eine akustisch ebenfalls nur gering wirksame Möblierung führen zu der in Abbildung 7.7 gezeigten Nachhallkurve.



Abbildung 7.6 Foto des Einzelbüros vor der Optimierung

Der Mittelwert der Nachhallzeit liegt im für Sprache wichtigen Frequenzbereich zwischen 250 Hz und 2 000 Hz bei einem Wert von $T = 0,91$ s. Die subjektiv unangenehme Wahrnehmung in dem Raum wird durch den sehr ungleichmäßigen Verlauf der Nachhallkurve ausgelöst. Das Maximum von $T = 1,61$ s wird bei 160 Hz erreicht, während oberhalb einer Frequenz von 2 000 Hz sogar der Wert der oberen Grenze des Zielbereichs von 0,60 s eingehalten wird.

Abbildung 7.7 Toleranzbereich der Nachhallzeit für den Wert $T_{\text{Soll}} = 0,50$ s im Vergleich mit der Messung vor und nach der Optimierung sowie dem Ergebnis der Planung



Der Soll-Wert der Nachhallzeit wurde zum Zeitpunkt des Projekts in Anlehnung an DIN 18041 (2004) [51] festgelegt, da neben der Nutzung als Einzelbüro auch regelmäßig Besprechungen mit mehreren Personen in dem Raum durchgeführt werden. Als reines Einzelbüro wäre heutzutage der maximale Wert der Nachhallzeit von $T_{\text{max}} \leq 0,60$ s nach VDI 2569 [192] anzusetzen, um den Raum der Raumakustikklasse A zuordnen zu können (siehe Abschnitt 5.2.2). Zur Optimierung des Raums wurden speziell im tieffrequenten Bereich wirksame Schallabsorber benötigt. Insgesamt wurde mit einer Fläche von 25 m^2 zusätzlicher Schallabsorber gerechnet. Davon waren 5 m^2 als im mittleren Frequenzbereich wirksame Rollos im Austausch gegen die vorhandenen Rollos sowie 20 m^2 als Resonanz-Absorber für tiefe Frequenzen vorgesehen. Das Ergebnis der Planung ist in Abbildung 7.7 dargestellt und zeigt ein vollständiges Erreichen der Zielwerte der Nachhallzeit.

Eine Messung konnte nach Durchführung der vorgeschlagenen Maßnahme nicht durchgeführt werden. Dies ist aus Sicht eines Akustikers leider häufig der Fall, aber darin begründet, dass bei dem Erreichen einer subjektiv guten Akustik kein Bedarf nach einem objektiven Nachweis mehr besteht.

Großes Mehrpersonenbüro – Neuplanung

Mit diesem Beispiel soll die Planung eines Mehrpersonenbüros entsprechend der in Abschnitt 5.2.2 vorgeschlagenen Klassifizierung gemäß der Richtlinie VDI 2569 [193] dargestellt werden. Der Raum verfügt über eine Grundfläche von ca. 320 m² und eine Höhe von 3,4 m. Das Volumen beträgt damit ca. 1088 m³. Im Folgenden wird dargestellt, welche Maßnahmen vorzusehen sind, um den Raum gemäß der Raumakustikklasse B oder auch der Raumakustikklasse A einzurichten.

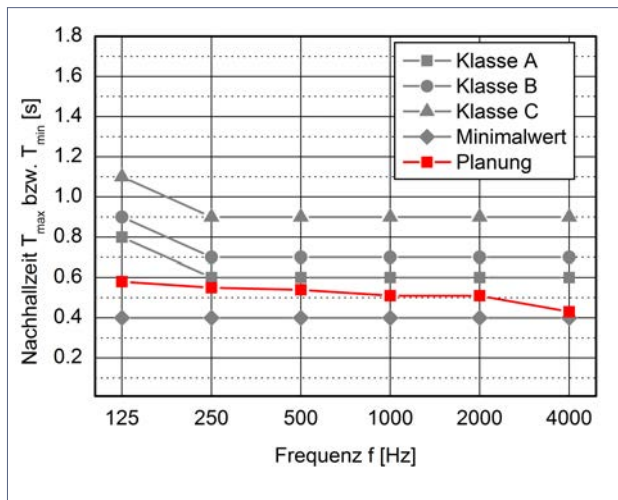


Abbildung 7.8 Berechnete Werte der Nachhallzeit aus der Planung im Vergleich mit den Empfehlungen für T_{\max}

Wie bei allen anderen raumakustischen Planungen ist auch im Großraumbüro zunächst die Nachhallzeit einzustellen. In Abbildung 7.8 ist die im Raum zu erwartende Nachhallzeit im Vergleich mit den Raumakustikklassen A, B und C nach Abschnitt 5.2.2 dargestellt. Als Schallabsorber wurde eine schallabsorbierende Decke aus gelochtem Gipskarton sowie ein perforierter Hohlraumboden jeweils auf der gesamten Fläche verwendet. Die Bedämpfung des Raums stellt somit in diesem Beispiel kein Problem dar. Allein durch die Schallab-

sorber an Decke und Boden ist ausreichend Absorption im Raum vorhanden, um die Raumakustikklasse A nach Abschnitt 5.2.2 zu erreichen. Die Hinweise zur Positionierung der Schallabsorber sind zu beachten. Insbesondere ist bei parallel ausgerichteten und gut reflektierenden Wänden die Möglichkeiten von Flatterechos zu beachten.

Um eine umfassende Klassifizierung im Sinne des Abschnitts 5.2.2 in der Planung zu erreichen, ist eine Prognose der Schallausbreitung im Großraumbüro anhand eines dreidimensionalen Raummodells notwendig. Wie in Abschnitt 6.7 beschrieben wird ein vereinfachtes Geometriemodell des Raums erstellt. Eine direkte Übernahme von eventuell vorhandenen dreidimensionalen Architekturmodellen ist in der Regel aufgrund des deutlich höheren Detaillierungsgrads nicht sinnvoll. In diesem Akustikmodell können dann verschiedene schallschirmende und gegebenenfalls auch schallabsorbierende Elemente in den Raum eingebracht werden. Eine Untersuchung verschiedener Ausstattungsvarianten ist, sobald das Modell besteht, leicht möglich.

Abbildung 7.9 Dreidimensionale Darstellung des Großraumbüros mit Schirmen und Darstellung der Messwege, Erläuterung siehe Text

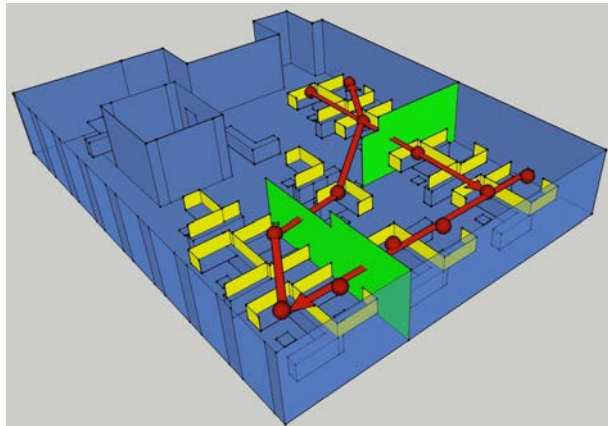


Abbildung 7.9 zeigt verschiedene Abschirmungen wie auch die zur Ermittlung der Stufen der Schallausbreitung verwendeten Messwege. Die Messwege sind als rote Pfeile dargestellt, die zwischen den mit roten Kugeln gekennzeichneten Arbeitsplätzen verlaufen. Insgesamt sind drei Messwege verwendet worden, um die Stufe der Schallausbreitung zu bestimmen. Auf diesen Messwegen wurden jeweils die Abklingrate $D_{2,S}$ und der Pegel $L_{p,A,S,4m}$ nach DIN EN ISO 3382, Teil 3, rechnerisch ermittelt.

Die sehr umfangreichen Ergebnisse der Planung mit dem dreidimensionalen Raummodell können an dieser Stelle nicht dargestellt werden. Es kann zusammenfassend festgestellt werden, dass für eine Klassifizierung in die Klasse A nach Abschnitt 5.2.2 sowohl die in Abbildung 7.9 gelb dargestellten Tischaufsätze wie auch die grün dargestellten Abschirmungen notwendig sind. Die grün dargestellten Elemente sind teilweise raumhoch und in anderen Bereichen 2,7 m hoch. Die Klasse B wird hingegen allein durch die 0,7 m hohen schallschirmenden Tischaufsätze erreicht. Ohne die raumteilenden Elemente und Tischaufsätze ist dieser Raum nicht klassifiziert.

Kleines Mehrpersonenbüro – Neuplanung

Im Rahmen eines Umzugs wurde eine alte Fabrik zu einem Bürogebäude umgenutzt. Neben einem Showroom waren Besprechungsräume wie auch verschiedene Mehrpersonenbüros vorzusehen, um den geänderten Erfordernissen der Nutzer gerecht zu werden. Zur raumakustischen Planung der Umgestaltung der Fabrikhallen wurde ein dreidimensionales Raummodell für die künftigen Bereiche erstellt. In Abbildung 7.10 ist eine Etage der ehemaligen Fabrik mit der geplanten Nutzung dargestellt. Im unteren Teil der Grafik sind die beiden als Mehrpersonenbüros vorgesehenen Bereiche zu erkennen. Oberhalb davon befinden sich Besprechungsräume und ein großer Raum für verschiedene Nutzungen.



Abbildung 7.10 3D-Modell zur Planung

Für das linke Mehrpersonenbüro sind im Folgenden die Ergebnisse einer Raumakustik-Simulation dargestellt. Zunächst wurde der Raumzustand ohne weitere akustische Maßnahmen untersucht. In diesem Zustand konnte die Nachhallzeit

im Raum gemessen und auf diese Weise die Simulation des leeren Raumzustands überprüft werden. Ausgehend von diesem »kalibrierten« Raummodell wurden die raumakustischen Maßnahmen und die Möblierungsplanung in das Rechenmodell eingepflegt.

Das Ergebnis zur Schallpegelverteilung im Raum für einen Sprecher ist in der oberen linken Grafik (Variante 1) dargestellt. Im Zuge der raumakustischen Planung wurden mit den Innenarchitekten sowie den Nutzern die schallabsorbierenden und schallschirmenden Maßnahmen im Raum und in der Möblierung optimiert (siehe Schallpegelkarte rechts, Variante 2, der Abbildung). Die verwendete Software gestattet es, die beide Karten zur Schallpegel-Verteilung im Raum voneinander zu subtrahieren; es ergibt sich als Differenz die untere Darstellung. Hier ist die Pegelsenkung in großen Raumbereichen deutlich zu erkennen. Eine statistische Auswertung zeigt, dass der Schallpegel durch die raumakustischen Maßnahmen im räumlichen Mittel um 2 dB abnimmt. In bestimmten Zonen beträgt die Pegelminderung mehr als 6 dB wie in der Differenzkarte zu erkennen ist.

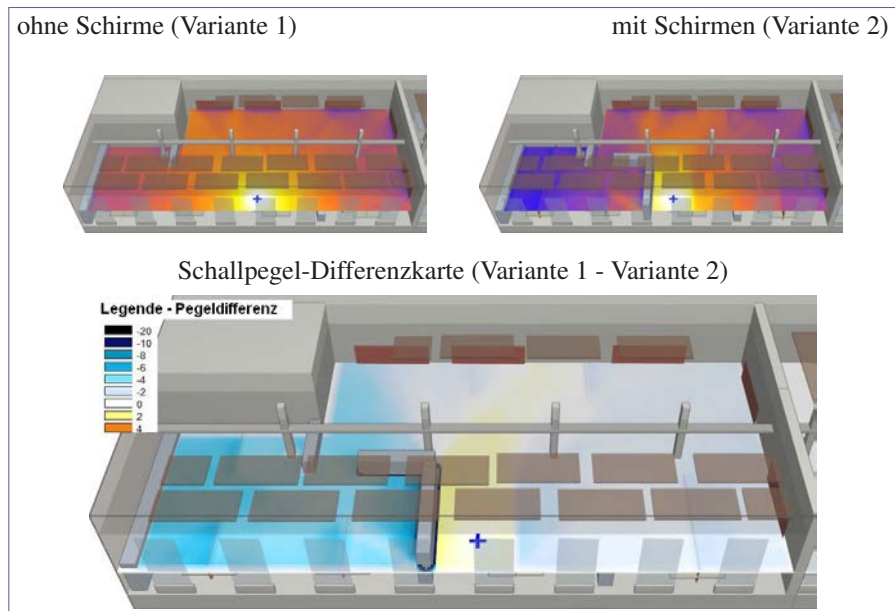


Abbildung 7.11 Schallpegel im Raum für zwei Ausstattungsvarianten und die Pegel-Differenzkarte

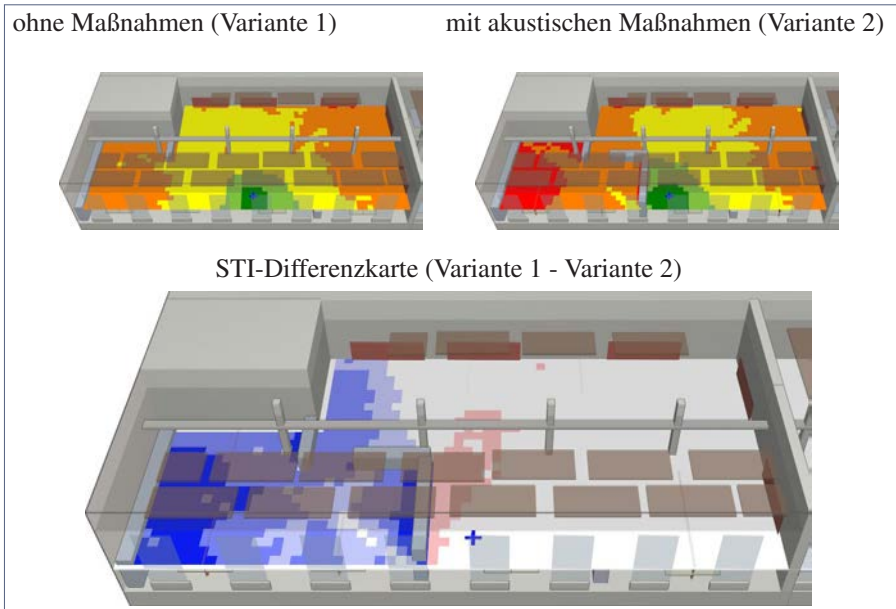


Abbildung 7.12 STI im Raum für zwei Ausstattungsvarianten und die STI-Differenzkarte

Nahe der Schallquelle bzw. des Sprechers tritt keine Änderung des Schallpegels auf, da dieser Bereich innerhalb des Hallradius liegt. Hier kann der Direktschall nur durch abschirmende Elemente in unmittelbarer Umgebung abgesenkt werden.

Neben dem Schallpegel bzw. dessen Verteilung im Raum wurde auch der STI-Wert flächenhaft simuliert. Die Ergebnisse sind in Abbildung 7.12 analog der Darstellung für den Schallpegel angegeben. Der räumliche Mittelwert des STI im Raum wurde durch die Maßnahmen um 0,03 und lokal in einigen Zonen deutlich stärker abgesenkt.

Nach Fertigstellung des Umbaus konnten Messungen in den Räumen durchgeführt werden. Das Ergebnis für die Nachhallzeit in dem betrachteten Mehrpersonenbüro ist in Abbildung 7.13 dargestellt. Im Vergleich mit den Empfehlungen der Raumakustikklasse A ist die Einhaltung dieser Vorgabe aus der Planung zu erkennen. Abschließend ist in Abbildung 7.14 ein Foto aus dem Raum wiedergegeben.

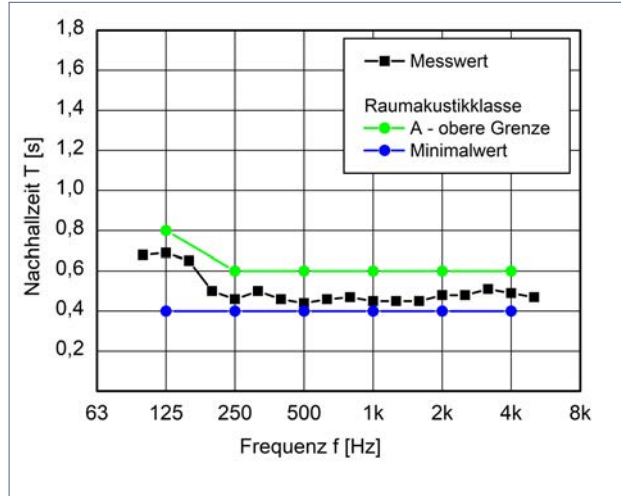


Abbildung 7.13 Gemessene Werte der Nachhallzeit im Vergleich mit den Empfehlungen für T_{\max}



Abbildung 7.14 Bild des fertigen Raums [Quelle: designfunktion Aschaffenburg]

Konferenzraum – Umbau im Bestand

Neben dem zuvor betrachteten Mehrpersonenbüros sind in dem Vorhaben auch Besprechungs- und Konferenzräume zu planen gewesen. Die Planung eines größeren Besprechungs- bzw. Konferenzraums wird hier vorgestellt. Eine Aufsicht auf das dreidimensionale Raummodell ist in Abbildung 7.15 dargestellt.



Abbildung 7.15 3D-Modell zur Planung

Mit einem Raumvolumen von ca. 155 m^3 ergibt sich nach Nutzungsart A3 »Unterricht/Kommunikation« der DIN 18041 (2016) [52] entsprechend Gleichung 5.3 eine Soll-Nachhallzeit $T_{\text{Soll}, A3}$ von 0,53 s. Der anzustrebende Toleranzbereich für die Frequenzabhängigkeit der Nachhallzeit ist in der Grafik in Abbildung 7.16 blau schraffiert eingetragen. Ausgestattet wurde der Raum mit einem Standard-Teppich (20 m^2) ohne besondere Akustikfunktion, weiterhin mit frei unter die Decke gehängten textilen Akustik-Elementen (17 m^2) mit einer Füllung aus PET-Vlies und denselben Elementen in direkter Wandmontage (10 m^2). Die faltbare Tür sowie die Wandverkleidung zur Aufnahme von Technik und einem großformatigen Monitor wurden als tieffrequent wirksame Elemente planerisch angesetzt. Weiterhin wurden zwölf Personen rechnerisch in der Planung berücksichtigt.

Abbildung 7.17 zeigt ein Bild des fertigen Raums. Im Vergleich mit der Planung und unter Berücksichtigung der Messunsicherheit liegt die gemessene Nachhallzeit im Toleranzbereich. Die Anforderungen nach DIN 18041 werden erreicht.

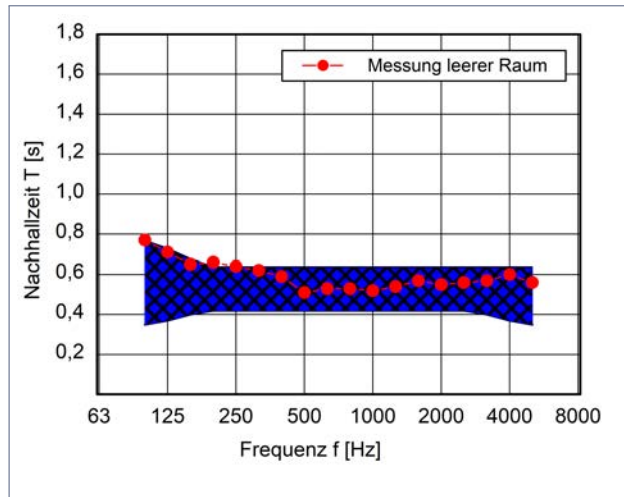


Abbildung 7.16 Gemessene Werte der Nachhallzeit im Vergleich mit den Anforderungen nach DIN 18041



Abbildung 7.17 Bild des fertigen Raums
[Quelle: designfunktion Aschaffenburg]

7.3 Mensa/Kantine

Mensa – Neuplanung

In diesem Abschnitt wird die Planung einer Kantine bzw. Mensa in einem Schulzentrum vorgestellt. Mit einer Grundfläche von 290 m^2 und einer Höhe von 3 m verfügt der Raum über ein Volumen von 870 m^3 . Die Gestaltung des Raums ist wie folgt geplant: Der Boden soll komplett mit einem harten Bodenbelag aus Linoleum belegt werden. Die Wände (ca. 30 m^2) sind verputzt und gestrichen. Neben Türen mit einer Gesamtfläche von 12 m^2 sind Fenster mit 100 m^2 vorhanden. Im mittleren Bereich der Decke wird eine Rasterdecke mit einer Flächengröße von 170 m^2 in den Raum eingebracht. Die restlichen 120 m^2 der Deckenfläche sind als gelochte Gipskartondecke ausgebildet. Als Einrichtungsgegenstände sind Holzgestühl mit Tischen für insgesamt 80 Personen vorgesehen. In Abbildung 7.18 ist die Aufsicht auf das zur Planung verwendete dreidimensionale Raummodell dargestellt.

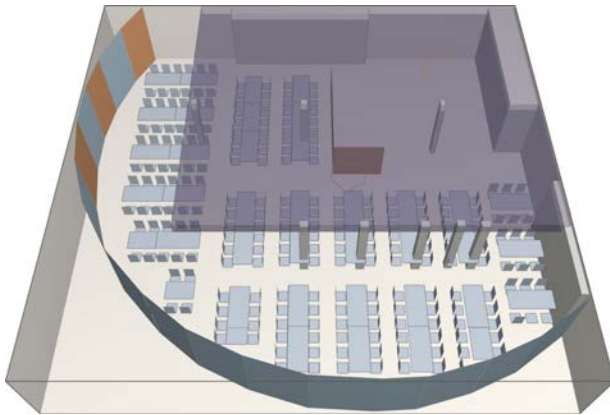


Abbildung 7.18 3D-Modell zur Planung der Mensa

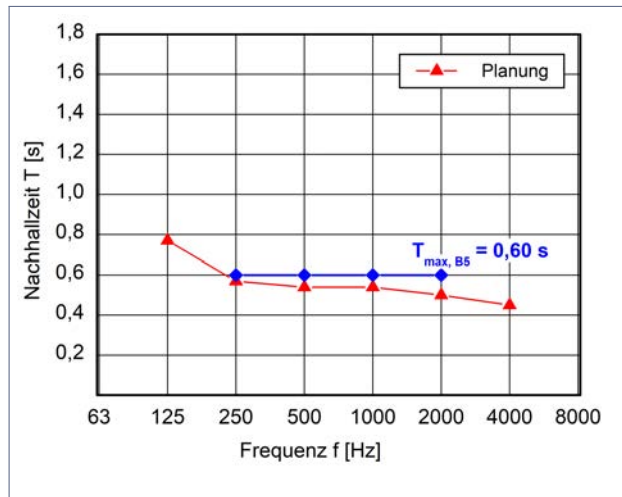
Die anzustrebende optimale Nachhallzeit ergibt sich nach den Empfehlungen der DIN 18041 [52] für Räume der Gruppe RG B5 (Räume mit besonderem Bedarf an Lärminderung und Raumkomfort, z. B. Speiseräume und Kantinen in Schulen und Kindertageseinrichtungen). Als Zielwert der Planung sind die Orientierungswerte für die Räume der Gruppe B der DIN 18041 [52] zu verwenden. Der Speiseraum ist der Nutzungsart B5 zuzuordnen. Bei einer Raumhöhe von $3,0 \text{ m}$ folgt nach den Vorgaben der DIN 18041 (siehe Tabelle 5.4) ein Wert von

$$\frac{A}{V} \geq \left[1,47 + 4,69 \lg \left(\frac{3,0\text{m}}{1\text{ m}} \right) \right]^{-1} = 0,27 \quad 7.1$$

Dieser Mindestwert $A/V \geq 0,27$ ist in den vier Oktaven zwischen 250 Hz und 2 000 Hz nachzuweisen. Dies entspricht einer maximalen Nachhallzeit $T_{\text{max},B5} = 0,60\text{ s}$.

Durch die oben genannten Materialien an Decke und Wänden wird dieser Orientierungswert eingehalten. In Abbildung 7.19 ist das Ergebnis der Berechnung im Vergleich mit der aus den Empfehlungen abgeleiteten Nachhallzeit dargestellt. Es ist anzumerken, dass neben der vollflächigen Belegung der Decke mit Schallabsorbern noch weitere Absorptionsflächen an den Wänden und vor den Fenster erforderlich sind.

Abbildung 7.19 Berechnete Werte der Nachhallzeit im Vergleich mit den Orientierungswerten nach DIN 18041



Der konkave Aufbau der Fensterfläche des Raums ist aus raumakustischer Sicht als kritisch zu bewerten. Geometrisch gerichtete Reflexionen an den Raumbegrenzungen (hier: konkave Fensterfläche) können zu Fokussierungseffekten führen. Daraus resultiert ein unausgeglichenes Schallfeld mit einem erhöhten Schallpegel an bestimmten Stellen im Raum. Im Rahmen der raumakustischen Beratung und Planung wurde daher empfohlen, ca. 40% der Fensterflächen mit einem akustisch wirksamen Blendschutz zu versehen, um Reflexionen bzw. Fokussierungen zu verhindern.

Kantine – Optimierung im Bestand

Ein ehemaliges Nebengebäude einer Produktionsstätte wurde zu einer Kantine umgenutzt. Hierbei wurde neben einigen Fenstern auch ein neues Dach eingebaut. Der umgebaute Raum verfügt mit einem Fliesenbelag, den verputzten Wänden, der Verglasung sowie einer glatten und unperforierten Sandwich-Metaldecke über nahezu keine schallabsorbierenden Einbauten. Nach Inbetriebnahme kam es zu Beschwerden über eine zu hohe Lautstärke im Kantenbetrieb und eine unzureichende Verständlichkeit von Sprache bei Betriebsversammlungen, die gelegentlich in dem Raum abgehalten werden. Abbildung 7.20 zeigt ein Bild der Kantine vor der raumakustischen Maßnahme.



Abbildung 7.20 Kantine vor der Optimierung mit schallharter Decke aus Metall

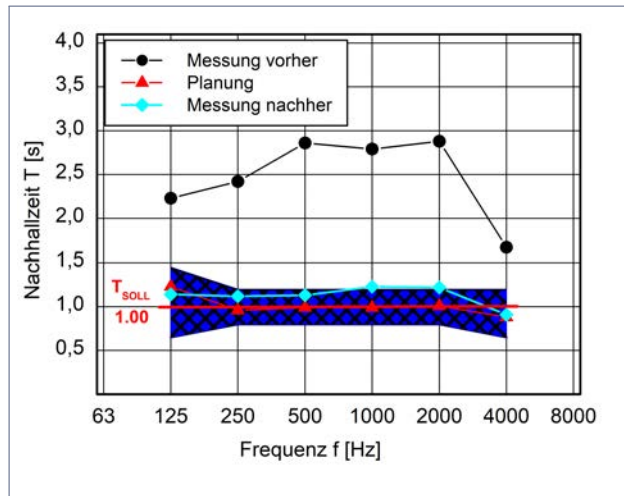
Bei einer Grundfläche von 278 m^2 und einer durchschnittlichen Raumhöhe von $4,5 \text{ m}$ ergibt sich ein Raumvolumen von $1\,250 \text{ m}^3$. Durch eine Messung der Nachhallzeit wurde die raumakustische Situation im Raum erfasst. Das Ergebnis der Messung ist in Abbildung 7.21 dargestellt. Mit Werten zwischen $1,67 \text{ s}$ bei $8\,000 \text{ Hz}$ und $2,87 \text{ s}$ bei 500 Hz ist die Nachhallzeit deutlich zu lang. Der Mittelwert der Nachhallzeit lag im für Sprache wichtigen Frequenzbereich zwischen 250 Hz und $2\,000 \text{ Hz}$ bei gut $2,7 \text{ s}$.

Nach den Empfehlungen der DIN 18041 [52] für Räume der Gruppe RG B3 (Speiseräume und Kantinen) kann als Zielwert für die Planung bei einer Raumhöhe von $4,50 \text{ m}$ ein Orientierungswert von

$$\frac{A}{V} \geq \left[3,13 + 4,69 \lg \left(\frac{4,5\text{m}}{1\text{ m}} \right) \right]^{-1} = 0,16 \quad 7.2$$

abgeleitet werden. Dieser Mindestwert $A/V \geq 0,16$ ist in den vier Oktaven zwischen 250 Hz und 2000 Hz nachzuweisen. Dies entspricht einer maximalen Nachhallzeit $T_{\max, B3} = 1,00$ s. Im Hinblick auf die gelegentliche Nutzung für Sprachvorträge bei den Betriebsversammlungen wurde eine Nachhallzeit von $T_{\text{SOLL}} = 1,00$ s empfohlen. Der sich daraus ergebende Toleranzbereich ist in Abbildung 7.21 als schraffierte Fläche zu erkennen.

Abbildung 7.21 Zielbereich der Nachhallzeit für den Wert $T_{\text{SOLL}} = 1,00$ s im Vergleich mit der Messung vor und nach der Optimierung sowie dem Ergebnis der Planung



Im Rahmen der raumakustischen Planung wurde erörtert, welche Möglichkeiten zur Einbringung von absorbierenden Flächen bestehen. Aufgrund der Fenster sowie weiterer Einbauten waren Wandflächen nur kleinteilig durch schallabsorbierende Aufbauten zu belegen. Dies wurde aufgrund des damit verbundenen Aufwands verworfen. Anhand der sehr langen Nachhallwerte war frühzeitig absehbar, dass eine äquivalente Absorptionsfläche von mindestens 150 m^2 in den Raum einzubringen war.

Als Ergebnis der Abstimmung wurde eine 230 m^2 große Absorberfläche an der Decke montiert. Es wurde ein geschichteter Aufbau bestehend aus Mineralwolle und einer feinkörnigen Putzbeschichtung gewählt. Der mittlere Absorp-

tionsgrad bzw. NRC-Wert dieses Aufbaus liegt bei 0,60. Die gesamte Aufbaustärke liegt bei 70 mm. In Abbildung 7.22 ist eine Aufnahme der Decke nach der Optimierungsmaßnahme wiedergegeben. Der optische Gesamteindruck konnte durch das verwendete Material weitgehend erhalten werden.



Abbildung 7.22 Kantine nach der Optimierung mit schallabsorbierender Decke mit Akustikputz-System

Im Vergleich zwischen dem Ergebnis der raumakustischen Planung und der Messung im fertiggestellten Raum ist eine Abweichung zu erkennen. Der vorausberechnete Wert wird in einzelnen Oktaven um bis zu 0,2 s überschritten. Somit werden auch die Orientierungswerte nach DIN 18041 knapp verfehlt. Die Ursache für diese Überschreitung wurde nicht weiter analysiert, hängt aber erfahrungsgemäß damit zusammen, dass die Schallabsorption nur in einer Raumrichtung (Decke – Boden) in den Raum eingebracht wurde. Auch wenn aufgrund der Strukturierung der Wandflächen durch Fenster und andere Einbauten kein Flatterecho im Raum wahrnehmbar war, steht diese Art der Positionierung streng genommen nicht im Einklang mit den Annahmen der zur Berechnung verwendeten Sabineschen Nachhallformel.

7.4 Restaurants

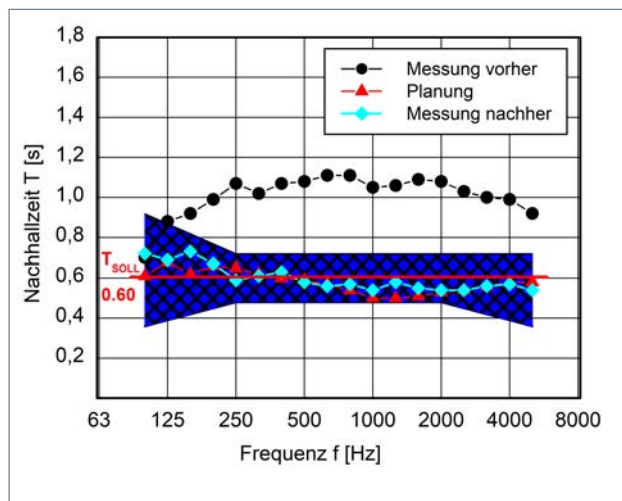
Optimierung im Bestand

In vielen Restaurants und Gaststätten kommt es zu Beschwerden über unzureichende raumakustische Bedingungen. Häufig ist ein Mangel an schallabsorbie-

renden Flächen hier der Auslöser für eine schlechte Akustik. Der resultierende lange Nachhall verringert die Sprachverständlichkeit, was durch ein Anheben der Sprechlautstärke unbewusst kompensiert wird und zu einem unangenehm hohen Lautstärkepegel führt.

In diesem Beispiel wird der Gastraum eines klassischen Speiselokals vorgestellt, in dem sich die Gäste regelmäßig über eine »schlechte Akustik« und zu hohe Lautstärken beschwerten. Zur objektiven Erfassung der Situation wurde eine Messung der Nachhallzeit durchgeführt.

Abbildung 7.23 Gemessene Nachhallzeit im Gastraum vor und nach der Optimierung im Vergleich mit dem Zielbereich und der Prognose der Nachhallzeit



Bei einer Grundfläche von 90 m^2 und einer durchschnittlichen Raumhöhe von $3,15 \text{ m}$ ergibt sich ein Raumvolumen von 284 m^3 . Auch hier ist die Frage nach der optimalen Nachhallzeit nach verschiedenen Gesichtspunkten abzuwägen. Nach DIN 18041 [52] kann bei dieser Raumhöhe für die Nutzungsart B3 (Speiseräume und Kantinen) ein Orientierungswert von $A/V \geq 0,18$ abgeleitet werden. Dies entspricht unter der Annahme eines diffusen Schallfelds einer maximalen Nachhallzeit $T_{\max, B3} = 0,90 \text{ s}$. Dieser Wert wird von der gemessenen Nachhallkurve klar überschritten. Im Sinne der Lärminderung wie auch der stark kommunikativen Nutzung wurde ein Soll-Wert von $T_{SOLL} = 0,6 \text{ s}$ gewählt. Der zugehörige Zielbereich ist in Abbildung 7.23 im Vergleich mit der gemessenen Nachhallkurve dargestellt.

Die maximale Nachhallzeit ist bei 800 Hz mit einem Wert von 1,1 s zu verzeichnen. Zwischen 250 Hz und 2000 Hz, also im gesamten für Sprache wichtigen Bereich, liegt die Nachhallzeit oberhalb von 1,0 s. Werte der Nachhallzeit von mehr als 1,0 s führen regelmäßig auch in solchen Räumen des Alltags zu Beschwerden.

Auf Grundlage des Messergebnisses konnte anhand einer Berechnung ermittelt werden, welchen Effekt eine vollständige Belegung der Decke mit einem Schallabsorber hat. Als schallabsorbierender Aufbau wurde eine mikroperforierte Folien-Spanndecke gewählt. 30 m² wurden mit einem Abstand von 100 mm und 50 m² mit einem Abstand von 30 mm zur vorhandenen Decke montiert. Der entstehende Hohlraum wurde auf ungefähr 50 % der Fläche mit 20 mm starker Mineralwolle befüllt. Die Prognoserechnung für die zu erwartende Nachhallzeit wurde durch eine durchgeführte Messung nach Abschluss der Maßnahme bestätigt (siehe Abbildung 7.23).



Abbildung 7.24 Gastraum mit schallabsorbierender Folien-Spanndecke

In Abbildung 7.24 ist ein Foto des Gastraums mit der mikroperforierten Folien-Spanndecke nach der Optimierung zu sehen. Aufgrund des Lochdurchmessers der Mikroperforation von weniger als 0,2 mm wurde der optische Eindruck im Vergleich mit der vorher vorhandenen und nun abgedeckten glatten Gipskartondecke nicht verändert. Subjektiv beschreiben sowohl die Gäste als auch der Betreiber eine deutliche Verbesserung der Akustik.

7.5 Pausenhalle

Optimierung im Bestand

Ein weiteres Beispiel ist eine moderne Pausenhalle, deren Begrenzungsflächen weitgehend aus Beton an den Wänden, einem Glasdach sowie einem harten Bodenbelag bestehen. Neben der Nutzung als Pausenhalle finden gelegentlich auch Schulversammlungen und kleine Feiern in dem Raum statt. Insgesamt verfügt der Raum über ein Volumen von ungefähr 870 m^3 . Die Abbildung 7.25 gibt einen Eindruck von dem Raum.

Als subjektive Beschwerden wurden eine übermäßige Lautstärke sowie auch eine unzureichende Sprachverständigung bei Versammlungen und Treffen geschildert. Eine Planung zur Raumakustik wurde bei dem Bauvorhaben nicht durchgeführt. Die in dem Foto erkennbaren farbigen Elemente an der Wand sollten nach Ansicht der Planer ausreichend zur Regulierung der Akustik sein.

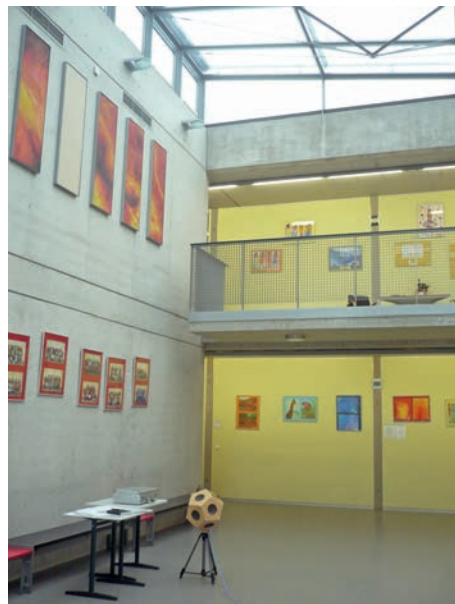


Abbildung 7.25 Pausenhalle mit Wänden aus Beton, Glasdach und hartem Bodenbelag

Die Messung der Nachhallzeit ergab die in Abbildung 7.26 dargestellte Nachhallkurve. Die maximale Nachhallzeit ist bei 200 Hz mit einem Wert von 3,4 s zu verzeichnen. Auch oberhalb von 1 000 Hz sinkt die Nachhallzeit nur geringfügig ab. Der Mittelwert der Nachhallzeit im für Sprache wichtigen Frequenzbereich zwischen 200 Hz und 2 000 Hz liegt bei 2,8 s.

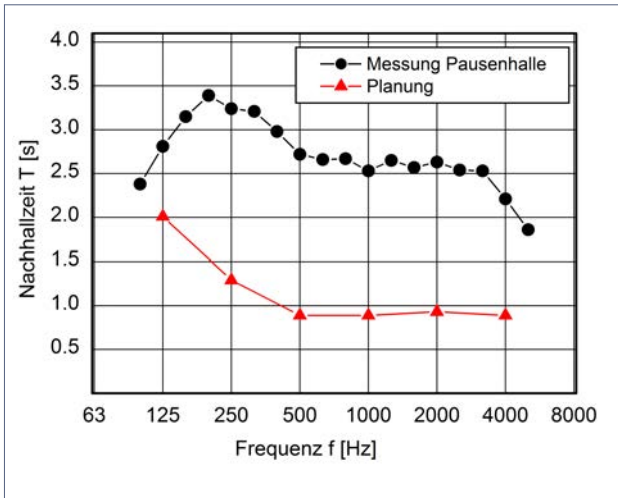


Abbildung 7.26 Gemessene Nachhallzeit in der Pausenhalle

Die Frage nach der optimalen Nachhallzeit ist in einem solchen Raum nach verschiedenen Gesichtspunkten abzuwägen. Nach DIN 18041 [52] kann bei einer Raumhöhe von 5 m für die Nutzungsart B2 (Eingangshallen, Treppenhäuser u. ä. Verkehrsflächen mit Aufenthaltsqualität) ein Orientierungswert von $A/V \geq 0,13$ abgeleitet werden, entsprechend einer maximalen Nachhallzeit $T_{\max, B2} = 0,90$ s. Nach der Vorgabe für die Nutzungsart B5 (Spielflure) ergibt sich ein Wert von $A/V \geq 0,21$ bzw. $T_{\max, B5} = 0,77$ s.

Die Empfehlung des Leitfadens des Umweltbundesamts [187] für Flure (siehe Abbildung 5.15) führt zu einem Wert von 1,7 s. Auch dieser Wert ist nach Erfahrung des Autors noch nicht geeignet, um die Beschwerden in dieser Situation verstummen zu lassen. Es wird in Anlehnung an die Nutzungsart B2 ein Wert der maximalen Nachhallzeit von 0,9 s empfohlen. Um dieses Ziel zu erreichen, sind ungefähr 100 m^2 eines hochwirksamen Absorbers notwendig.

In Abbildung 7.26 ist das Ergebnis einer Berechnung dargestellt. Hierzu wurde ein 80 mm starker Aufbau aus Steinwolle verwendet. Andere Materialien und Aufbauten mit maximaler Aufbaustärke von 100 mm führen zu ähnlichen Nachhallkurven. Ein Anstieg bei tiefen Frequenzen wäre nur mit größeren Aufbaustärken oder mit speziell auf tiefe Frequenzen abgestimmten Re-

sonanzabsorbieren zu vermeiden. Entsprechende Resonanzabsorber wurden aus Kosten- und Platzgründen frühzeitig in der Abstimmung verworfen. Im weiteren Planungsverlauf stellte sich die Anbringung dieser benötigten Absorberfläche selbst mit geringer Aufbaustärke als problematisch dar, wobei im Wesentlichen gestalterische und finanzielle Aspekte den Ausschlag für die Entscheidung gegen eine »gute Akustik« in der Pausenhalle gaben.

7.6 Sporthallen

Sporthalle – Optimierung im Bestand

Eine große Sechs-Feld-Sporthalle wurde im Rahmen einer grundlegenden Sanierung neu gestaltet. Im Rahmen dieser Maßnahme sollte die Raumakustik betrachtet und optimiert werden. Die Grundfläche der Sporthalle beträgt bei einer Länge von 91 m und einer Breite von 29 m etwa 2640 m², das Volumen beträgt etwa 18 600 m³. In dem zum Zeitpunkt der Messung vorhandenen Rohbau waren noch keine akustisch wirksamen Materialien vorhanden. Eine Hälfte der Bodenfläche der Halle verfügte noch über den ursprünglichen Schwingboden. Dieser war zum Zeitpunkt der Messung durch Sperrholzplatten abgedeckt. Ferner waren sieben Dachflächenfenster während der Messung noch nicht eingesetzt. In Abbildung 7.27 ist ein Blick in die entkernte Sporthalle im Rohbauzustand zu sehen.



Abbildung 7.27 Sporthalle während der Umbauphase

Um die in der fertig ausgebauten Halle zu erwartende Nachhallzeit möglichst genau abschätzen zu können, wurde eine orientierende Messung der Nach-

hallzeit im Rohbau durchgeführt. Das Ergebnis in Oktavbandbreite ist in der Abbildung 7.28 dargestellt.

Für die mehrzügige Nutzung der Sporthalle ist eine Unterteilung durch fünf Vorhänge geplant gewesen, die variabel eingesetzt werden können. Jeder der sechs Hallenbereiche verfügt über ein aufgewölbtes Lichtband an der Decke. Die übrigen Deckenbereiche dazwischen werden mit einem Absorber aus Blähglasgranulat mit Akustikputzbeschichtung belegt. Die Wandbereiche werden im unteren Teil mit einem Prallschutz aus Nadelvlies und im oberen Teil mit Holzpaneelen versehen, die zur Wand mit einer Schicht aus Mineralwolle abgepolstert sein werden. Im fertigen Zustand wird die gesamte Halle mit einem Schwingboden ausgestattet sein.

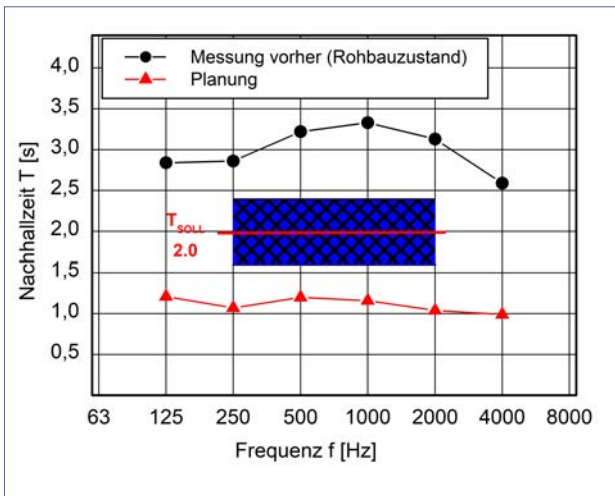


Abbildung 7.28 Nachhallzeit aus Messung und in der Planung für die Sporthalle

Nach DIN 18041 [52] ist bei einem Raumvolumen von mehr als 10 000 m³ für die Nutzungsart A5 (Sport) ein Sollwert der Nachhallzeit von $T_{\text{Soll}, A5} = 2,0$ s vorgesehen (siehe Gleichung 5.6). Für diese Nutzungsart ist die Soll-Nachhallzeit mit einer Genauigkeit von $\pm 20\%$ um den Zielwert T_{Soll} zwischen 250 Hz und 2000 Hz einzuhalten. Dieser Bereich ist in Abbildung 7.28 schraffiert dargestellt.

Nach DIN 18041 ist die Einhaltung der Anforderungen ebenfalls in den geteilten Hallenteilen nachzuweisen. Dies wurde im Rahmen der raumakustischen

Planung berücksichtigt, indem die einzelnen Hallenteile ebenfalls separat untersucht wurden.

Im Rahmen der raumakustischen Planung der zu erwartenden Situation in der ungeteilten und geteilten Sporthalle nach den vorliegenden Architektenplänen ergab sich, dass über die ohnehin vorgesehenen Oberflächen hinaus keine weiteren schallabsorbierenden Maßnahmen nötig waren. Die Anforderungen der DIN 18041 wurden bereits übererfüllt. Im Sinne der Lärminderung wurde die Planung nicht geändert. Auch für temporäre Beschallungsanlagen, beispielsweise bei den regelmäßigen Groß- oder Musikveranstaltungen ist eine möglichst geringe Nachhallzeit in der Halle vorteilhaft.

Sporthalle – Neuplanung

Es wird der Neubau einer Drei-Feld-Sporthalle geplant. Die Grundfläche soll ca. $34 \times 45 \text{ m}^2$ betragen; dies führt bei einer durchschnittlichen Raumhöhe von 9,5 m zu einem Raumvolumen von ca. $14\,700 \text{ m}^3$. In der Sporthalle ist weiterhin eine Tribüne mit 502 Sitzplätzen vorgesehen, welche ab einer Höhe von 2,9 m oberhalb des Hallenbodens an einer der langen Hallenseiten ansteigend angeordnet sind. In der Abbildung 7.29 sind die beiden Planungsvarianten des raumakustischen 3D-Modells zur Simulation dargestellt.

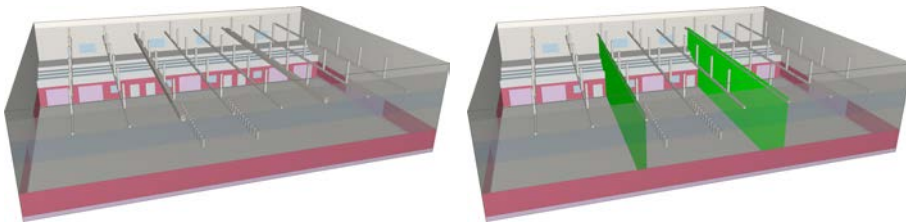


Abbildung 7.29 Sporthalle geöffneter (links) und unterteilter Zustand (rechts).

Die drei Felder der Sporthalle können durch zwei faltbare Trennvorhänge abgetrennt werden, deren Oberflächen aus perforiertem Kunstleder bestehen sollen. In geteiltem Zustand verfügt jedes der drei Segmente der Sporthalle über ein Raumvolumen von ca. $4\,900 \text{ m}^3$. Die Trennvorhänge hängen an schalldurchlässigen Bindern und bilden zur Decke keinen bündigen Abschluss. Die Decke ist mit einer schallabsorbierenden gelochten Trapezblechdecke belegt. In der Halle ist in einer langen Wand ein Fensterband eingelassen. An allen

vier Wänden verfügt die Sporthalle über einen textilen Prallschutz bis zu einer Höhe von ca. 2,9 m. Oberhalb des Prallschutzes sind die Wände aus Sichtbeton. Der Boden ist mit PVC/ Linoleum bedeckt und damit wie auch die übrigen Wandflächen schallreflektierend. Die Sporthalle verfügt über fünf große Tore zu den Geräteräumen und vier zum Flur führende Zugangstüren.

Für Sporthallen mit flexiblen Trennwänden sind die Anforderungen sowohl für den ungeteilten wie auch für den geteilten Zustand nachzuweisen. Für die Drei-Feld-Sporthalle ergibt sich der Zielwert der Nachhallzeit nach der Anforderung für die Nutzungsart A5 (Sport) DIN 18041 [52]. Mit einem Volumen von etwa $14\,700\text{ m}^3$ im ungeteilten Zustand beträgt die Ziel-Nachhallzeit $T_{\text{Soll,A5}} = 2,00\text{ s}$. Für diese Nutzungsart ist die Soll-Nachhallzeit mit einer Genauigkeit von $\pm 20\%$ um den Zielwert T_{Soll} zwischen 250 Hz und 2000 Hz einzuhalten. Dieser Bereich ist in Abbildung 7.28 schraffiert dargestellt. In geteiltem Zustand beträgt das Raumvolumen je Raumteil ca. $4\,900\text{ m}^3$. Die Ziel-Nachhallzeit liegt dann für jeden Raumteil bei $T_{\text{Soll,A5}} = 1,77\text{ s} \pm 20\%$.

Durch die durchgeführte Abstimmung mit den planenden Architekten konnte die Einhaltung der Anforderungen für beide Zustände in der Halle nachgewiesen werden. Auch für den geteilten Zustand mit drei Raumteilen liegt der maximale Wert der frequenzabhängigen Nachhallzeit unter $1,77\text{ s} + 20\% = 2,1\text{ s}$.

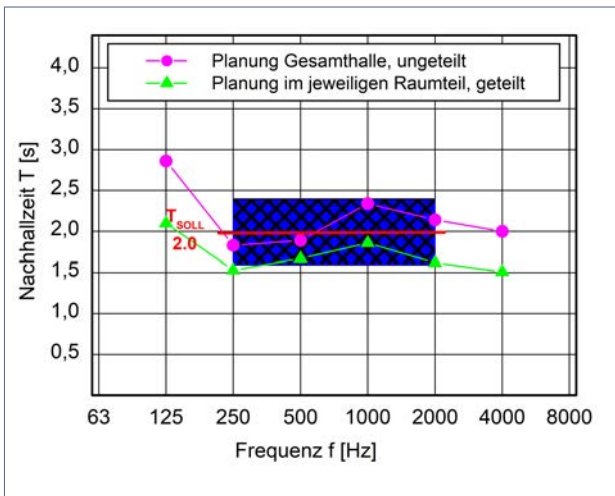


Abbildung 7.30 Nachhallzeit in der geteilten und ungeteilten Halle aus der Planung

Im Rahmen der schalltechnischen Planung der Sporthalle wurde weiterhin das Thema der Schalldämmung zwischen den verschiedenen Hallenteilen thematisiert. Nach DIN 18032-2 »Hallen für Turnen, Spiele und Mehrzwecknutzung Teil 4: Doppelschalige Trennvorhänge« [46] muss der Trennvorhang zwischen den Hallenteilen im betriebsfertigen Zustand ein bewertetes Bau-Schalldämm-Maß von $R'_{w} = 18$ dB aufweisen. Im Modell wurde dieser Zustand mit komplett geschlossenen Trennvorhängen und einer ausreichend hohen Anzahl an Strahlen simuliert, um die vorhandene Pegelminderung zwischen den Hallenteilen zu erhalten.

Planerisch war eine Teilöffnung oberhalb der Trennvorhänge sowie im Bereich der Tribüne zu untersuchen. Mit Hilfe des 3D-Modells wurden somit verschiedene Varianten mit Teilöffnungen der Trennvorhänge untersucht. Das Schalldämm-Maß einer komplett geschlossenen Trennwand wird durch die Öffnung einzelner Teilbereiche grundsätzlich verringert. Dabei ist das Maß der Verringerung im Bereich der Tribüne deutlich geringer einzuschätzen als im Bereich des Binders unter der Hallendecke. Mit Hilfe des 3D-Modells konnte somit auch diese eher bauakustische Frage beantwortet und entschieden werden.

7.7 Schwimmbäder

Schwimmbad – Optimierung im Bestand

In einem neu errichteten Schwimmbad kam es zur Eröffnungsfeier und auch unmittelbar danach zu Beschwerden über die raumakustische Situation. Es wurde eine zu hohe Lautstärke sowie eine mangelhafte Sprachverständlichkeit für Durchsagen beschrieben. Daraufhin wurde eine Messung der Nachhallzeit durchgeführt. Das Ergebnis ist in Abbildung 7.31 dargestellt. Neben Fliesen an Boden und Wänden verfügt die Halle über eine unperforierte Holzverkleidung an der Decke sowie große Glasflächen nach außen und zu den innenliegenden Funktionsbereichen. Das Volumen der Halle beträgt ca. $3\,300\text{ m}^3$ bei einer Grundfläche von 640 m^2 .

Mit Hilfe eines dreidimensionalen Raummodells wurde die Situation in der Halle nachgebildet. Ausgehend von diesem Modell wurden die notwendigen schallabsorbierenden Maßnahmen in Abstimmung mit dem Bauherrn und den

Architekten festgelegt. Nach umfangreicher Diskussion wurden auf ca. 25 Prozent der Decke perforierte Holzpaneele mit einer Aufbauhöhe von 200 mm montiert. Neben diesen schallabsorbierenden Deckenelementen wurde an einer Wand ein feuchtraumtauglicher Akustikputz auf eine Vorwandkonstruktion mit einer Trägerplatte aus Glasschaum mit einer Aufbauhöhe von 100 mm in den Raum eingebracht.

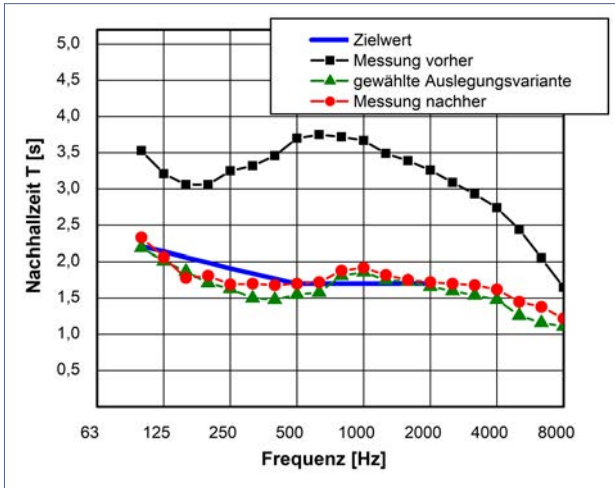


Abbildung 7.31 Obergrenze der Nachhallzeit im Vergleich mit der Messung vor und nach der Optimierung sowie dem Ergebnis der Planung

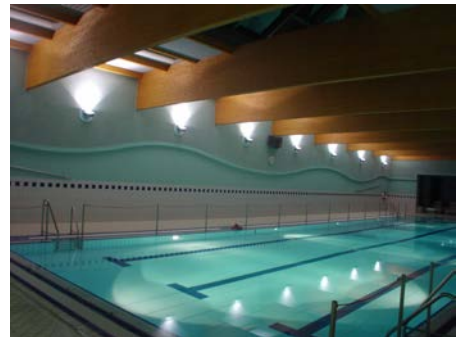


Abbildung 7.32 Schwimmbad vor (links) und nach der Optimierung (rechts)

Die Situation vor und nach der Optimierung ist in Abbildung 7.32 dargestellt. Die verwendete Konstruktion an der Wand ist an der Unterkante geschwungen ausgebildet. An den umlaufenden Wänden wurde insgesamt eine Fläche von 160 m² mit dem 100 mm starken Absorberaufbau installiert. Durch die

Absenkung der Nachhallzeit von 3,5 s (Mittelwert im Sprachfrequenzbereich zwischen 250 Hz und 2000 Hz) auf einen Wert von 1,6 s wurde die Situation deutlich verbessert.

Schwimmbad – Neuplanung

Bei der Neuplanung eines Freizeitbades war die raumakustische Situation in verschiedenen Räumen des Gebäudes zu untersuchen. Neben einer großen Schwimmhalle waren Nebenbereiche wie Gastronomie, Foyer und Umkleiden raumakustisch zu bewerten. Im Rahmen der raumakustischen Auslegung wurde berechnet, welche Schallabsorber in welcher Kombination am besten geeignet sind, um eine angemessene raumakustische Situation in der Schwimmhalle sowie in den anderen untersuchten Räumen zu gewährleisten.

Das Gebäude verfügt über einen großen Raum mit einer gläsernen Kuppel über dem nahezu kreisrunden Freizeitbecken (siehe Abbildung 7.33). Die Grundfläche inklusive einer ca. 450 m² großen Wasserfläche in zwei Becken (Freizeitbecken und Sportbecken) liegt bei einer Größe von insgesamt 1300 m². Das Volumen beträgt ca. 5800 m³.

Als Zielwert für die Nachhallzeit wurde die Vorgabe der 4. Auflage der Richtlinie des Koordinierungskreis' Bäder [34] mit einem maximalen Wert der Nachhallzeit $T_{\max} = 1,7$ s oberhalb von 500 Hz verwendet (siehe Abbildung 5.17 sowie die Anmerkungen auf Seite 175).

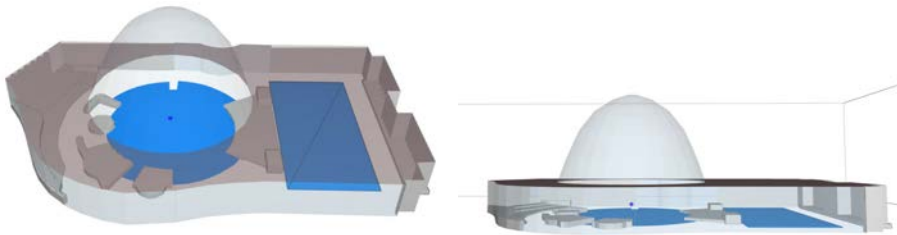


Abbildung 7.33 Schrägaufsicht (links) und Seitenansicht (rechts) des 3D-Modells zur raumakustischen Simulation

Insgesamt wurden fünf Materialvarianten in Kombination verschiedener Schallabsorber an Decke und Wänden untersucht. Als Planungsvariante 1 wurden eine akustisch wirksame Rasterdecke (ca. 200 m² mit 200 mm Abhängung) im Bereich des rechteckigen Sportbeckens und eine Belegung der restlichen Deckenfläche mit einer abgehängten Decke mit Akustikputz (ca. 650 m² mit

80 mm Abhängung) bewertet. Als Planungsvariante 2 wird das Ergebnis mit ca. 650 m² mit 400 mm Abhängung, ca. 200 m² mit 400 mm Abhängung) im Bereich des Sportbeckens und zusätzlich ca. 65 m² Absorbern im Wandbereich mit 50 mm Bautiefe in Abbildung 7.34 gezeigt. Anzumerken ist, dass alle mit den planenden Architekten abgestimmten Materialvarianten die vorgegebenen Anforderungen erfüllt haben. Die Auslegungsvariante mit der geringeren Abhänghöhe im Bereich des Sportbeckens zeigt hierbei sogar geringfügig kürzere Werte der Nachhallzeit.

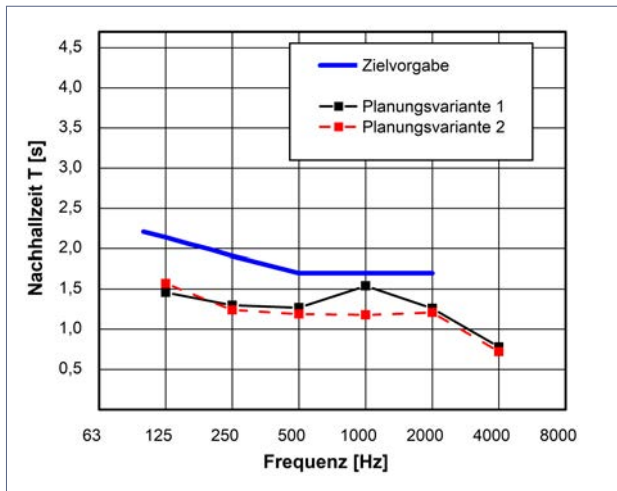


Abbildung 7.34 Obergrenze der Nachhallzeit im Vergleich mit dem Ergebnis von zwei Planungsvarianten

Die Positionierung der schallabsorbierenden Flächen wurde im 3D-Modell aufgegriffen und überprüft. Die zu erwartenden Fokussierungen aus der Glas-kuppel konnten ebenfalls untersucht und als unschädlich und nicht belästigend bewertet werden, da bei der zu erwartenden Nutzung als Freizeitbad in der Regel nicht mit über der Wasseroberfläche stehenden Personen zu rechnen ist.

Weiterhin wurden in dem neuen Bad schallabsorbierende Decken und teilweise auch Wandbelegungen im Foyer, im Gastronomiebereich sowie weiteren Funktionsbereichen wie Umkleiden, Fluren und Wartezonen umgesetzt. Auf diese Weise wurde in diesem Freizeitbad ein insgesamt ruhiges akustisches Klima geschaffen.

8 Anhang

8.1 Materialdaten

In diesem Anhang sind eine Reihe von Werten für die Schallabsorption zusammengetragen. Es handelt sich hierbei um Werte aus Normen, wie der DIN 18041 [52], Lehrbüchern [19, 27, 84, 85], Sammlungen von Werten [42], Herstellerangaben und auch eigenen Untersuchungen. Zu verweisen ist ebenfalls auf die Schallabsorptionstabelle der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt [1].

Für flächige Absorber ist neben dem frequenzabhängigen Absorptionsgrad α_s , der jeweils für die sechs Oktaven von 125 Hz bis 4000 Hz angegeben wird, für alle der angeführten Materialien auch der NRC-Wert, siehe Abschnitt 3.6.3, wie auch der bewertete Schallabsorptionsgrad α_w nach DIN EN ISO 11654 [66], siehe Abschnitt 3.6.2, angegeben. Der NRC-Wert ist der auf ein Vielfaches von 0,05 gerundete arithmetische Mittelwert der vier Terzwerte für 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz und 2000 Hz. Sofern die frequenzabhängigen Werte in allen Oktaven als Vielfaches von 0,05 angegeben sind, handelt es sich um Werte des praktischen Schallabsorptionsgrads α_p nach DIN EN ISO 11654 [66].

Für nicht-flächige Absorber wird nach den Vorgaben der DIN EN ISO 354 [72] die äquivalente Absorptionsfläche A_{obj} bzw. A angegeben. Diese bezieht sich jeweils auf ein Element oder Objekt. Eine Einzahlbewertung der äquivalenten Absorptionsfläche, wie die Kenngrößen NRC oder α_w , existiert momentan für nicht-flächige Absorber nicht.

Im Folgenden sind die Absorptionswerte in acht Tabellen zusammengefasst. Hierbei wurde versucht, die Materialien und Aufbauten nach Anwendungsbereichen zu sortieren, wobei die Zuordnung nicht immer eindeutig ist. In der folgenden Tabelle ist eine Übersicht der Absorptionstabellen dargestellt.

Übersicht der Absorptionstabellen

Tabelle	Materialien
8.1	Schallabsorptionsgrad nach Anhang G, DIN 18041
8.2	Schallabsorptionsfläche nach Anhang G, DIN 18041
8.3	Schallabsorptionsgrad für flächenhafte Bodenbeläge und Bodenaufbauten
8.4	Schallabsorptionsgrad für flächenhafte Schallabsorber für die großflächige Belegung von Decken – Rasterdecken – Glaswolle / Steinwolle / Mineralwolle – Rasterdecke – gelochter Gipskarton – Deckenputzsysteme – Folienspanndecke
8.5	Schallabsorptionsgrad für modulare Schallabsorber für die Belegung von Decken und Wänden – Schaumstoffe – Holzwolle-Leichtbauplatten – Mineralwolle – Mineralfaser – Glasfaser / Glaswolle – Melaminharzschaum
8.6	Schallabsorptionsgrad für weitere Materialien an Decken und Wänden – Geschlossene Gipskartondecke – Perforierte Gipskarton-Platten – Metallverkleidungen – Putz und Ziegelsteine – Holzplatten – Durchsichtige Kunststoffe – Verglasungen / Fenster
8.7	Schallabsorptionsgrad für Vorhänge, Baffles und weitere Materialien – Vorhänge – Baffle-Absorber – Theaterbestuhlung, flächenhaft – Weitere Angaben
8.8	Schallabsorptionsfläche für Möbel, Einrichtungsgegenstände und Personen – Schränke – Stellwände – Personen, Sitzmöbel

In den Tabellen 8.1 bis 8.8 werden jeweils die folgenden Symbole und Abkürzungen verwendet:

Abkürzungen:	
α_s	Schallabsorptionsgrad nach DIN EN ISO 354 [72], ASTM 423 [11]
α_w	bewerteter Schallabsorptionsgrad nach DIN EN ISO 11654 [66]
A	äquivalente Absorptionsfläche ⁵ von Gegenständen, Personen, Objekte, Frei-Elemente etc. in m ²
A _{obj}	äquivalente Absorptionsfläche Einzelobjekt nach DIN EN ISO 354 [72] in m ²
GK	Gipskarton
GW	Glaswolle
HR	Hohlraum
KH	gesamte Konstruktionshöhe eines Aufbaus (z. B. abgehängte Decke oder Absorbermodul)
LA	Lochflächenanteil
MW	Mineralwolle
NRC	Noise reduction coefficient nach ASTM 432 [11]
OH	Ordnerhöhe, 1 OH = ca. 34 cm
PM	poröses Material als Auf- oder Einlage
ρ	Rohdichte in kg/m ³
SW	Steinwolle
WA	Wandabstand oder Abstand zur Begrenzungsfläche
Ξ	längenspezifischer Strömungswiderstand

⁵ Aus Zitiergründen in DIN 18041, Abkürzung der äquivalenten Absorptionsfläche mit Bezeichnung A.

Absorptionsgrade aus DIN 18041

Graphik Absorptionsgrad	Beschreibung und Absorptionswerte
	<p>a Mauerziegelwand, unverputzt, Fugen ausgestrichen b Mauerwerk aus Hohllochziegeln, Löcher sichtbar, 60 mm vor Massivwand c Glattputz</p> <p>Oktav-Mittenfrequenz [Hz] Einzahlangabe 125 250 500 1k 2k 4k NRC α_w</p> <p>a 0,03 0,03 0,03 0,04 0,05 0,06 0,05 0,05 b 0,11 0,22 0,34 0,35 0,51 0,43 0,35 0,40 c 0,02 0,02 0,03 0,03 0,04 0,06 0,05 0,05</p>
	<p>a Kalkzementputz b Tapete auf Kalkzementputz c Spiegel vor der Wand</p> <p>Oktav-Mittenfrequenz [Hz] Einzahlangabe 125 250 500 1k 2k 4k NRC α_w</p> <p>a 0,03 0,03 0,02 0,04 0,05 0,05 0,05 0,05 b 0,02 0,03 0,04 0,05 0,07 0,08 0,05 0,05 c 0,12 0,10 0,05 0,04 0,02 0,02 0,05 0,05(L)</p>
	<p>a Tür, Holz, lackiert b Stuckgips, unverputzter Beton c Marmor, Fliesen, Klinker</p> <p>Oktav-Mittenfrequenz [Hz] Einzahlangabe 125 250 500 1k 2k 4k NRC α_w</p> <p>a 0,10 0,08 0,06 0,05 0,05 0,05 0,05 0,05(L) b 0,02 0,02 0,03 0,04 0,05 0,05 0,05 0,05 c 0,01 0,01 0,02 0,02 0,03 0,03 0,00 0,05</p>
	<p>a Fenster (Isolierverglasung) b Parkettfußboden, aufgeklebt c Parkettfußboden, auf Blindboden</p> <p>Oktav-Mittenfrequenz [Hz] Einzahlangabe 125 250 500 1k 2k 4k NRC α_w</p> <p>a 0,28 0,20 0,11 0,06 0,03 0,02 0,10 0,10(L) b 0,04 0,04 0,05 0,06 0,06 0,06 0,05 0,05 c 0,20 0,15 0,10 0,09 0,06 0,10 0,10 0,10(L)</p>

Tabelle 8.1 Schallabsorptionsgrad nach Anhang G, DIN 18041 [51] und zugehörige Einzahlangaben nach DIN EN ISO 11654 [66] und ASTM 423 [11].

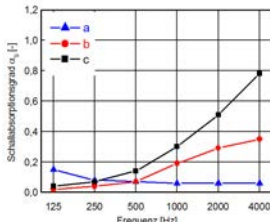
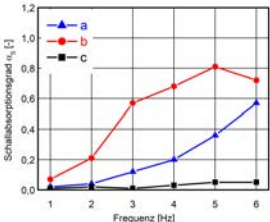
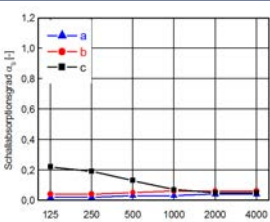
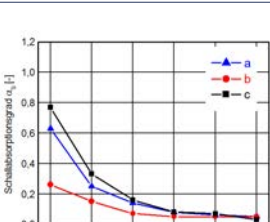
Absorptionsgrade aus DIN 18041																																								
Grafik Absorptionsgrad	Beschreibung und Absorptionswerte																																							
	<p>a Parkettfußboden, hohl liegend</p> <p>b Teppichboden, bis 6 mm Florhöhe, auf massivem Untergrund</p> <p>c Teppichboden, 7 mm bis 10 mm Florhöhe, auf massivem Untergrund</p> <table><tr><th colspan="2">Oktav-Mittenfrequenz [Hz]</th><th colspan="2">Einzahlangabe</th></tr><tr><th>125</th><th>250</th><th>500</th><th>1k</th><th>2k</th><th>4k</th><th>NRC</th><th>α_w</th></tr><tr><td>a</td><td>0,15</td><td>0,08</td><td>0,07</td><td>0,06</td><td>0,06</td><td>0,06</td><td>0,05</td><td>0,05(L)</td></tr><tr><td>b</td><td>0,02</td><td>0,04</td><td>0,07</td><td>0,19</td><td>0,29</td><td>0,35</td><td>0,15</td><td>0,15(H)</td></tr><tr><td>c</td><td>0,04</td><td>0,07</td><td>0,14</td><td>0,30</td><td>0,51</td><td>0,78</td><td>0,25</td><td>0,25(H)</td></tr></table>	Oktav-Mittenfrequenz [Hz]		Einzahlangabe		125	250	500	1k	2k	4k	NRC	α_w	a	0,15	0,08	0,07	0,06	0,06	0,06	0,05	0,05(L)	b	0,02	0,04	0,07	0,19	0,29	0,35	0,15	0,15(H)	c	0,04	0,07	0,14	0,30	0,51	0,78	0,25	0,25(H)
Oktav-Mittenfrequenz [Hz]		Einzahlangabe																																						
125	250	500	1k	2k	4k	NRC	α_w																																	
a	0,15	0,08	0,07	0,06	0,06	0,06	0,05	0,05(L)																																
b	0,02	0,04	0,07	0,19	0,29	0,35	0,15	0,15(H)																																
c	0,04	0,07	0,14	0,30	0,51	0,78	0,25	0,25(H)																																
	<p>a Nadelfilz, 7 mm bis 10 mm Florhöhe, auf massivem Untergrund</p> <p>b 5 mm Teppich mit 5 mm Filzunterlage, auf massivem Untergrund</p> <p>c PVC-Fußbodenbelag (2,5 mm) auf Betonboden</p> <table><tr><th colspan="2">Oktav-Mittenfrequenz [Hz]</th><th colspan="2">Einzahlangabe</th></tr><tr><th>125</th><th>250</th><th>500</th><th>1k</th><th>2k</th><th>4k</th><th>NRC</th><th>α_w</th></tr><tr><td>a</td><td>0,04</td><td>0,07</td><td>0,12</td><td>0,20</td><td>0,36</td><td>0,57</td><td>0,20</td><td>0,20(H)</td></tr><tr><td>b</td><td>0,07</td><td>0,21</td><td>0,57</td><td>0,68</td><td>0,81</td><td>0,72</td><td>0,55</td><td>0,50(H)</td></tr><tr><td>c</td><td>0,01</td><td>0,02</td><td>0,01</td><td>0,03</td><td>0,05</td><td>0,05</td><td>0,05</td><td>0,05</td></tr></table>	Oktav-Mittenfrequenz [Hz]		Einzahlangabe		125	250	500	1k	2k	4k	NRC	α_w	a	0,04	0,07	0,12	0,20	0,36	0,57	0,20	0,20(H)	b	0,07	0,21	0,57	0,68	0,81	0,72	0,55	0,50(H)	c	0,01	0,02	0,01	0,03	0,05	0,05	0,05	0,05
Oktav-Mittenfrequenz [Hz]		Einzahlangabe																																						
125	250	500	1k	2k	4k	NRC	α_w																																	
a	0,04	0,07	0,12	0,20	0,36	0,57	0,20	0,20(H)																																
b	0,07	0,21	0,57	0,68	0,81	0,72	0,55	0,50(H)																																
c	0,01	0,02	0,01	0,03	0,05	0,05	0,05	0,05																																
	<p>a Linoleum auf Beton</p> <p>b furnierte Holz- oder Spanplatte dicht vor festem Untergrund</p> <p>c 4 mm Hartfaserplatte, kassettiert ohne Dämmstoff, WA 60 mm, KH = 64 mm</p> <table><tr><th colspan="2">Oktav-Mittenfrequenz [Hz]</th><th colspan="2">Einzahlangabe</th></tr><tr><th>125</th><th>250</th><th>500</th><th>1k</th><th>2k</th><th>4k</th><th>NRC</th><th>α_w</th></tr><tr><td>a</td><td>0,02</td><td>0,02</td><td>0,03</td><td>0,03</td><td>0,04</td><td>0,04</td><td>0,05</td><td>0,05</td></tr><tr><td>b</td><td>0,04</td><td>0,04</td><td>0,05</td><td>0,06</td><td>0,06</td><td>0,06</td><td>0,05</td><td>0,05</td></tr><tr><td>c</td><td>0,22</td><td>0,19</td><td>0,13</td><td>0,07</td><td>0,05</td><td>0,05</td><td>0,10</td><td>0,10(L)</td></tr></table>	Oktav-Mittenfrequenz [Hz]		Einzahlangabe		125	250	500	1k	2k	4k	NRC	α_w	a	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04	0,04	0,05	0,05	b	0,04	0,04	0,05	0,06	0,06	0,06	0,05	0,05	c	0,22	0,19	0,13	0,07	0,05	0,05	0,10	0,10(L)
Oktav-Mittenfrequenz [Hz]		Einzahlangabe																																						
125	250	500	1k	2k	4k	NRC	α_w																																	
a	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04	0,04	0,05	0,05																																
b	0,04	0,04	0,05	0,06	0,06	0,06	0,05	0,05																																
c	0,22	0,19	0,13	0,07	0,05	0,05	0,10	0,10(L)																																
	<p>a 4 mm Hartfaserplatte, kassettiert mit 40 mm MW-Platte, WA 60 mm, KH = 64 mm</p> <p>b 4 mm Hartfaserplatte, kassettiert ohne Dämmstoff, WA 120 mm, KH = 124 mm</p> <p>c 4 mm Sperrholzplatte, 40 mm MW, WA 120 mm KH = 124 mm</p> <table><tr><th colspan="2">Oktav-Mittenfrequenz [Hz]</th><th colspan="2">Einzahlangabe</th></tr><tr><th>125</th><th>250</th><th>500</th><th>1k</th><th>2k</th><th>4k</th><th>NRC</th><th>α_w</th></tr><tr><td>a</td><td>0,63</td><td>0,25</td><td>0,14</td><td>0,08</td><td>0,06</td><td>0,05</td><td>0,15</td><td>0,10(L)</td></tr><tr><td>b</td><td>0,26</td><td>0,15</td><td>0,07</td><td>0,05</td><td>0,05</td><td>0,05</td><td>0,10</td><td>0,05(L)</td></tr><tr><td>c</td><td>0,77</td><td>0,33</td><td>0,16</td><td>0,08</td><td>0,07</td><td>0,03</td><td>0,15</td><td>0,10(L)</td></tr></table>	Oktav-Mittenfrequenz [Hz]		Einzahlangabe		125	250	500	1k	2k	4k	NRC	α_w	a	0,63	0,25	0,14	0,08	0,06	0,05	0,15	0,10(L)	b	0,26	0,15	0,07	0,05	0,05	0,05	0,10	0,05(L)	c	0,77	0,33	0,16	0,08	0,07	0,03	0,15	0,10(L)
Oktav-Mittenfrequenz [Hz]		Einzahlangabe																																						
125	250	500	1k	2k	4k	NRC	α_w																																	
a	0,63	0,25	0,14	0,08	0,06	0,05	0,15	0,10(L)																																
b	0,26	0,15	0,07	0,05	0,05	0,05	0,10	0,05(L)																																
c	0,77	0,33	0,16	0,08	0,07	0,03	0,15	0,10(L)																																

Tabelle 8.1 (Fortsetzung)

Absorptionsgrade aus DIN 18041

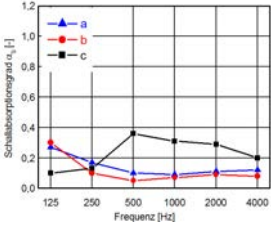
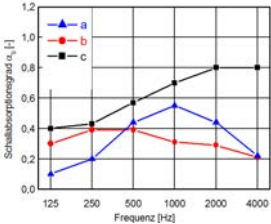
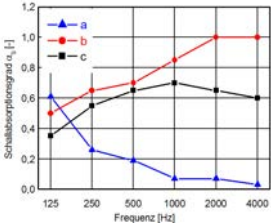
Grafik Absorptionsgrad	Beschreibung und Absorptionswerte
	<p>a Gipsplatte, 9,5 mm stark, WA 25 mm b Gipsplatte, 9,5 mm stark, WA 60 mm, Hohlraum kassettiert c Kino-Bildwand</p> <p>Oktav-Mittenfrequenz [Hz] Einzahlangabe 125 250 500 1k 2k 4k NRC α_w a 0,27 0,17 0,05 0,31 0,29 0,20 0,10 0,10(L) b 0,30 0,10 0,36 0,70 0,80 0,80 0,10 0,10 c 0,10 0,13 0,36 0,31 0,29 0,20 0,25 0,30</p>
	<p>a Bühnenöffnungen mit Dekorationen b Bücherregal in Bibliotheken (je m² Oberfläche) c Lochsteine (vorsichtige Annahme)</p> <p>Oktav-Mittenfrequenz [Hz] Einzahlangabe 125 250 500 1k 2k 4k NRC α_w a 0,40 0,43 0,57 0,70 0,80 0,80 0,65 0,65(H) b 0,30 0,39 0,39 0,31 0,29 0,21 0,35 0,30(L) c 0,10 0,20 0,44 0,55 0,44 0,22 0,40 0,40(L)</p>
	<p>a 3,5 mm Hartfaserplatte, 40 mm MW, 30 mm Holzleisten, 750 mm x 500 mm Kasten b 15 mm Mineralplatte mit Vlieskaschierung, 200 mm zur Rohdecke, ohne rückseitige Zusatzmaßnahmen c 15 mm Mineralplatte fein genadelt, 200 mm zur Rohdecke, ohne rückseitige Zusatzmaßnahmen</p> <p>Oktav-Mittenfrequenz [Hz] Einzahlangabe 125 250 500 1k 2k 4k NRC α_w a 0,61 0,26 0,19 0,07 0,07 0,03 0,15 0,10(L) b 0,50 0,65 0,70 0,85 1,00 1,00 0,80 0,80(H) c 0,35 0,55 0,65 0,70 0,65 0,60 0,65 0,70</p>

Tabelle 8.1 (Fortsetzung)

Absorptionsgrade aus DIN 18041

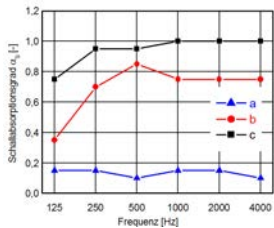
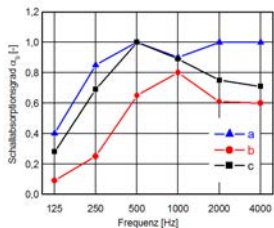
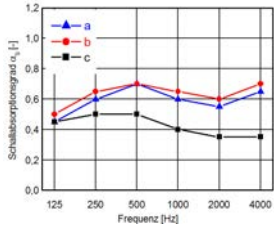
Grafik Absorptionsgrad	Beschreibung und Absorptionswerte																																							
	<p>a 15 mm Mineralplatte ungenadelt, 200 mm zur Rohdecke, ohne rückseitige Zusatzmaßnahmen</p> <p>b gelochte Metallkassette, 16% Lochflächenanteil, 2,5 mm Lochdurchmesser, Akustikvlies, 200 mm zur Rohdecke, ohne rückseitige Zusatzmaßnahmen</p> <p>c 20 mm Recycle-Glaswollplatte mit mikroporöser Farbbeschichtung, 200 mm zur Rohdecke, rückseitiger Tieftonabsorber</p> <table><tr><th>Oktav-Mittenfrequenz [Hz]</th><th colspan="2">Einzahlangabe</th></tr><tr><th></th><th>125</th><th>250</th><th>500</th><th>1k</th><th>2k</th><th>4k</th><th>NRC</th><th>α_w</th></tr><tr><td>a</td><td>0,15</td><td>0,15</td><td>0,10</td><td>0,15</td><td>0,15</td><td>0,10</td><td>0,15</td><td>0,15</td></tr><tr><td>b</td><td>0,35</td><td>0,70</td><td>0,85</td><td>0,75</td><td>0,75</td><td>0,75</td><td>0,75</td><td>0,80</td></tr><tr><td>c</td><td>0,75</td><td>0,95</td><td>0,95</td><td>1,00</td><td>1,00</td><td>1,00</td><td>1,00</td><td>1,00</td></tr></table>	Oktav-Mittenfrequenz [Hz]	Einzahlangabe			125	250	500	1k	2k	4k	NRC	α_w	a	0,15	0,15	0,10	0,15	0,15	0,10	0,15	0,15	b	0,35	0,70	0,85	0,75	0,75	0,75	0,75	0,80	c	0,75	0,95	0,95	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Oktav-Mittenfrequenz [Hz]	Einzahlangabe																																							
	125	250	500	1k	2k	4k	NRC	α_w																																
a	0,15	0,15	0,10	0,15	0,15	0,10	0,15	0,15																																
b	0,35	0,70	0,85	0,75	0,75	0,75	0,75	0,80																																
c	0,75	0,95	0,95	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00																																
	<p>a 15 mm Recycle-Glaswollplatte, Vliesbeschichtung, 200 mm zur Rohdecke, ohne rückseitige Zusatzmaßnahmen</p> <p>b Spanndecke mikroperforiert, 100 mm Abstand bzw. Luftschicht, kein Akustikvlies im Hohlraum</p> <p>c Spanndecke mikroperforiert, 100 mm Abstand bzw. Luftschicht, 40 mm Akustikvlies direkt an Rückwand</p> <table><tr><th>Oktav-Mittenfrequenz [Hz]</th><th colspan="2">Einzahlangabe</th></tr><tr><th></th><th>125</th><th>250</th><th>500</th><th>1k</th><th>2k</th><th>4k</th><th>NRC</th><th>α_w</th></tr><tr><td>a</td><td>0,40</td><td>0,85</td><td>1,00</td><td>0,90</td><td>1,00</td><td>1,00</td><td>0,95</td><td>1,00</td></tr><tr><td>b</td><td>0,09</td><td>0,25</td><td>0,65</td><td>0,80</td><td>0,61</td><td>0,60</td><td>0,60</td><td>0,55(M)</td></tr><tr><td>c</td><td>0,28</td><td>0,69</td><td>1,00</td><td>0,89</td><td>0,75</td><td>0,71</td><td>0,85</td><td>0,80</td></tr></table>	Oktav-Mittenfrequenz [Hz]	Einzahlangabe			125	250	500	1k	2k	4k	NRC	α_w	a	0,40	0,85	1,00	0,90	1,00	1,00	0,95	1,00	b	0,09	0,25	0,65	0,80	0,61	0,60	0,60	0,55(M)	c	0,28	0,69	1,00	0,89	0,75	0,71	0,85	0,80
Oktav-Mittenfrequenz [Hz]	Einzahlangabe																																							
	125	250	500	1k	2k	4k	NRC	α_w																																
a	0,40	0,85	1,00	0,90	1,00	1,00	0,95	1,00																																
b	0,09	0,25	0,65	0,80	0,61	0,60	0,60	0,55(M)																																
c	0,28	0,69	1,00	0,89	0,75	0,71	0,85	0,80																																
	<p>a Gipsplatten Rasterdecke 8/18 Rundlochung, 15,5% Lochflächenanteil, 200 mm zur Rohdecke, Akustikvlies, ohne Mineralwollauflage</p> <p>b Gipsplatten Rasterdecke 8/18 Rundlochung, 15,5% Lochflächenanteil, 200 mm zur Rohdecke, Akustikvlies, 20 mm Mineralwollauflage</p> <p>c Gipsplatten Rasterdecke 12/25 Quadratlochung, 7,8% Lochflächenanteil, 200 mm zur Rohdecke, Akustikvlies, 20 mm Mineralwollauflage</p> <table><tr><th>Oktav-Mittenfrequenz [Hz]</th><th colspan="2">Einzahlangabe</th></tr><tr><th></th><th>125</th><th>250</th><th>500</th><th>1k</th><th>2k</th><th>4k</th><th>NRC</th><th>α_w</th></tr><tr><td>a</td><td>0,45</td><td>0,60</td><td>0,70</td><td>0,60</td><td>0,55</td><td>0,65</td><td>0,60</td><td>0,60</td></tr><tr><td>b</td><td>0,50</td><td>0,65</td><td>0,70</td><td>0,65</td><td>0,60</td><td>0,70</td><td>0,65</td><td>0,65</td></tr><tr><td>c</td><td>0,45</td><td>0,50</td><td>0,50</td><td>0,40</td><td>0,35</td><td>0,35</td><td>0,45</td><td>0,40(L)</td></tr></table>	Oktav-Mittenfrequenz [Hz]	Einzahlangabe			125	250	500	1k	2k	4k	NRC	α_w	a	0,45	0,60	0,70	0,60	0,55	0,65	0,60	0,60	b	0,50	0,65	0,70	0,65	0,60	0,70	0,65	0,65	c	0,45	0,50	0,50	0,40	0,35	0,35	0,45	0,40(L)
Oktav-Mittenfrequenz [Hz]	Einzahlangabe																																							
	125	250	500	1k	2k	4k	NRC	α_w																																
a	0,45	0,60	0,70	0,60	0,55	0,65	0,60	0,60																																
b	0,50	0,65	0,70	0,65	0,60	0,70	0,65	0,65																																
c	0,45	0,50	0,50	0,40	0,35	0,35	0,45	0,40(L)																																

Tabelle 8.1 (Fortsetzung)

Absorptionsgrade aus DIN 18041

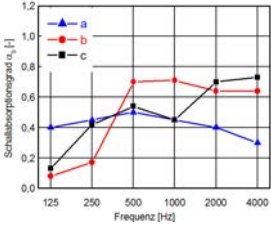
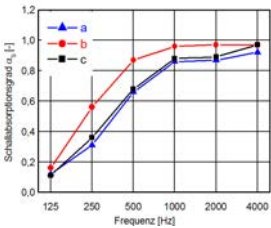
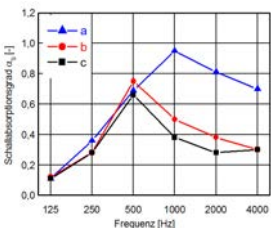
Grafik Absorptionsgrad	Beschreibung und Absorptionswerte										
	<p>a Gipsplatten Rasterdecke 12/25 Quadratlochung, 7,8% Lochflächenanteil, 65 mm zur Rohdecke, Akustikvlies, 20 mm Mineralwollauflage</p> <p>b Holzwolle-Leichtbauplatten 35 mm, direkt auf Wand</p> <p>c Holzwolle-Leichtbauplatten 25 mm, Hohlraum leer, Wandabstand 50 mm</p> <table> <tr> <th>Oktav-Mittenfrequenz [Hz]</th><th>Einzahlangabe</th></tr> <tr> <td>125 250 500 1k 2k 4k NRC α_w</td><td></td></tr> <tr> <td>a 0,40 0,45 0,50 0,45 0,40 0,30</td><td>0,45</td></tr> <tr> <td>b 0,08 0,17 0,70 0,71 0,64 0,64</td><td>0,55 0,45(MH)</td></tr> <tr> <td>c 0,13 0,42 0,54 0,45 0,70 0,73</td><td>0,55 0,55(L)</td></tr> </table>	Oktav-Mittenfrequenz [Hz]	Einzahlangabe	125 250 500 1k 2k 4k NRC α_w		a 0,40 0,45 0,50 0,45 0,40 0,30	0,45	b 0,08 0,17 0,70 0,71 0,64 0,64	0,55 0,45(MH)	c 0,13 0,42 0,54 0,45 0,70 0,73	0,55 0,55(L)
Oktav-Mittenfrequenz [Hz]	Einzahlangabe										
125 250 500 1k 2k 4k NRC α_w											
a 0,40 0,45 0,50 0,45 0,40 0,30	0,45										
b 0,08 0,17 0,70 0,71 0,64 0,64	0,55 0,45(MH)										
c 0,13 0,42 0,54 0,45 0,70 0,73	0,55 0,55(L)										
	<p>a Melaminharz-Schaumstoff, Rohdichte 8 kg/m³ bis 10 kg/m³, 30 mm dick</p> <p>b Melaminharz-Schaumstoff, Rohdichte 8 kg/m³ bis 10 kg/m³, 50 mm dick</p> <p>c 40 mm Mineralwollmatte (20 kg/m³), ohne Lochblechabdeckung</p> <table> <tr> <th>Oktav-Mittenfrequenz [Hz]</th><th>Einzahlangabe</th></tr> <tr> <td>125 250 500 1k 2k 4k NRC α_w</td><td></td></tr> <tr> <td>a 0,12 0,31 0,66 0,86 0,87 0,92</td><td>0,70 0,60(MH)</td></tr> <tr> <td>b 0,16 0,56 0,87 0,96 0,97 0,97</td><td>0,85 0,85</td></tr> <tr> <td>c 0,11 0,36 0,68 0,88 0,89 0,97</td><td>0,70 0,65(MH)</td></tr> </table>	Oktav-Mittenfrequenz [Hz]	Einzahlangabe	125 250 500 1k 2k 4k NRC α_w		a 0,12 0,31 0,66 0,86 0,87 0,92	0,70 0,60(MH)	b 0,16 0,56 0,87 0,96 0,97 0,97	0,85 0,85	c 0,11 0,36 0,68 0,88 0,89 0,97	0,70 0,65(MH)
Oktav-Mittenfrequenz [Hz]	Einzahlangabe										
125 250 500 1k 2k 4k NRC α_w											
a 0,12 0,31 0,66 0,86 0,87 0,92	0,70 0,60(MH)										
b 0,16 0,56 0,87 0,96 0,97 0,97	0,85 0,85										
c 0,11 0,36 0,68 0,88 0,89 0,97	0,70 0,65(MH)										
	<p>a 40 mm Mineralwollmatte (20 kg/m³), mit Lochblechabdeckung (18%)</p> <p>b Gipsplatte 9,5 mm, 8/18 Rundlochung, 15% Lochflächenanteil, mit Faservlies hinterlegt, Abstand 100 mm</p> <p>c Gipsplatte geschlitz, 8,8% offene Fläche, mit Faservlies hinterlegt, Abstand 100 mm</p> <table> <tr> <th>Oktav-Mittenfrequenz [Hz]</th><th>Einzahlangabe</th></tr> <tr> <td>125 250 500 1k 2k 4k NRC α_w</td><td></td></tr> <tr> <td>a 0,11 0,36 0,69 0,95 0,81 0,70</td><td>0,70 0,65(M)</td></tr> <tr> <td>b 0,12 0,28 0,75 0,50 0,38 0,30</td><td>0,50 0,45(M)</td></tr> <tr> <td>c 0,11 0,28 0,66 0,38 0,28 0,30</td><td>0,40 0,40(M)</td></tr> </table>	Oktav-Mittenfrequenz [Hz]	Einzahlangabe	125 250 500 1k 2k 4k NRC α_w		a 0,11 0,36 0,69 0,95 0,81 0,70	0,70 0,65(M)	b 0,12 0,28 0,75 0,50 0,38 0,30	0,50 0,45(M)	c 0,11 0,28 0,66 0,38 0,28 0,30	0,40 0,40(M)
Oktav-Mittenfrequenz [Hz]	Einzahlangabe										
125 250 500 1k 2k 4k NRC α_w											
a 0,11 0,36 0,69 0,95 0,81 0,70	0,70 0,65(M)										
b 0,12 0,28 0,75 0,50 0,38 0,30	0,50 0,45(M)										
c 0,11 0,28 0,66 0,38 0,28 0,30	0,40 0,40(M)										

Tabelle 8.1 (Fortsetzung)

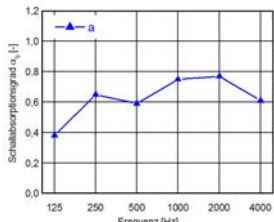
Absorptionsgrade aus DIN 18041									
Grafik Absorptionsgrad				Beschreibung und Absorptionswerte					
				<p>a gelochte Langfeld-Metallkassette, 20 % Lochflächenanteil, 3 mm Lochdurchmesser, Akustikfilz, 30 mm Abstand</p> <p>Oktav-Mittenfrequenz [Hz] </p>					

Tabelle 8.1 (Fortsetzung)



Abbildung 8.1 Wand aus
porösen Ziegelsteinen (Mau-
erwerk aus Hohllochziegeln,
Löcher sichtbar, 60 mm vor
Massivwand, HR leer)

Äquivalente Absorptionsflächen aus DIN 18041

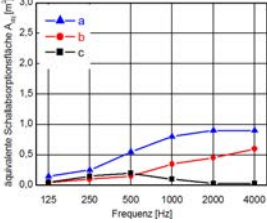
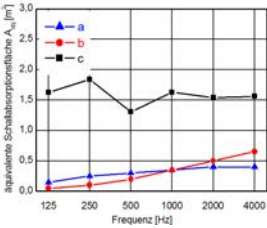
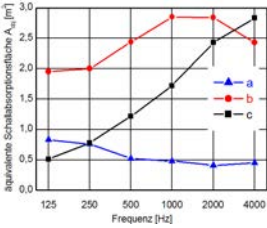
Grafik Absorptionsfläche	Beschreibung und Absorptionswerte
	<p>a männliche Person im Anzug, sitzend b weibliche Person im Sommerkleid, sitzend c einfacher Polsterstuhl mit Kunstleder bezogen</p> <p>Oktav-Mittenfrequenz [Hz] 125 250 500 1k 2k 4k</p> <p>a 0,15 0,25 0,55 0,80 0,90 0,90 b 0,05 0,10 0,15 0,35 0,45 0,60 c 0,05 0,15 0,20 0,10 0,03 0,03</p>
	<p>a einfacher Polsterstuhl mit Textilbezug b einzelne Person in einer Gruppe, sitzend oder stehend, 1 je 6 m² Fläche; typischer Mindestwert c Schrank mit schallabsorbierender Jalousie, ohne Rückwand, 1200 mm, 5 Ordnerhöhen (1,75 m) hoch, frei im Raum stehend</p> <p>Oktav-Mittenfrequenz [Hz] 125 250 500 1k 2k 4k</p> <p>a 0,15 0,25 0,30 0,35 0,40 0,40 b 0,05 0,10 0,20 0,35 0,50 0,65 c 1,63 1,84 1,31 1,63 1,54 1,56</p>
	<p>a Schrank mit glatter Jalousie, ohne Rückwand, 1200 mm breit, 5 Ordnerhöhen (1,75 m) hoch, frei im Raum stehend b Schrank 5 Ordnerhöhen (1,75 m) hoch, gelochte Tür und absorbierende Rückwand, 1200 mm breit, 435 mm tief, frei im Raum stehend c Stellwand gering absorbierend, 1024 mm x 1590 mm x 63 mm, frei im Raum stehend</p> <p>Oktav-Mittenfrequenz [Hz] 125 250 500 1k 2k 4k</p> <p>a 0,83 0,76 0,52 0,48 0,41 0,45 b 1,95 2,00 2,44 2,85 2,84 2,43 c 0,51 0,78 1,22 1,72 2,43 2,83</p>

Tabelle 8.2 Schallabsorptionsfläche nach Anhang G, DIN 18041 [51]

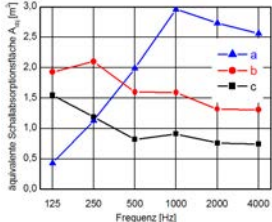
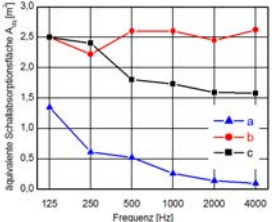
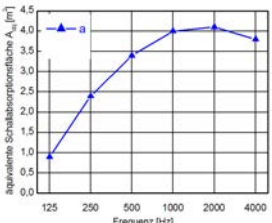
Äquivalente Absorptionsflächen aus DIN 18041	
Grafik Absorptionsfläche	Beschreibung und Absorptionswerte
	<p>a Stellwand hoch absorbierend, 1024 mm x 1590 mm x 63 mm, frei im Raum stehend</p> <p>b Schrank 4 Ordnerhöhen (1,4 m) hoch, 1400 mm breit, 435 mm tief, akustisch wirksame Schiebetür, akustisch wirksame Rückwand, frei im Raum stehend</p> <p>c Schrank 4 Ordnerhöhen (1,4 m) hoch, 1400 mm breit, 435 mm tief, akustisch wirksame Schiebetür, akustisch wirksame Rückwand, direkt vor Wand stehend</p> <p>Oktav-Mittenfrequenz [Hz] 125 250 500 1k 2k 4k</p> <p>a 0,43 1,13 1,99 2,96 2,73 2,56</p> <p>b 1,93 2,10 1,60 1,59 1,32 1,31</p> <p>c 1,55 1,19 0,82 0,91 0,76 0,74</p>
	<p>a Schrank 3 Ordnerhöhen (1,05 m) hoch, 1500 mm breit, 350 mm tief, Seitenwand, Rückwand und Frontklapptüren unperforiert, frei im Raum stehend</p> <p>b Schrank 3 Ordnerhöhen (1,05 m) hoch, 1500 mm breit, 350 mm tief, Seitenwand, Rückwand und Frontklapptüren perforiert (Vlieseinlage), frei im Raum stehend</p> <p>c Schrank 3 Ordnerhöhen (1,05 m) hoch, 1500 mm breit, 350 mm tief, Seitenwand, Rückwand perforiert (Vlieseinlage), Frontklapptüren unperforiert, frei im Raum stehend</p> <p>Oktav-Mittenfrequenz [Hz] 125 250 500 1k 2k 4k</p> <p>a 1,35 0,61 0,52 0,26 0,14 0,10</p> <p>b 2,50 2,22 2,60 2,60 2,45 2,62</p> <p>c 2,50 2,40 1,80 1,73 1,59 1,58</p>
	<p>a Deckensegel aus recycelter Glaswolle mit mikroporöser Farbbeschichtung, 2400 x 1200 mm, 40 mm dick, 200 mm zur Rohdecke abgehängt</p> <p>Oktav-Mittenfrequenz [Hz] 125 250 500 1k 2k 4k</p> <p>a 0,90 2,40 3,40 4,00 4,10 3,80</p>

Tabelle 8.2 (Fortsetzung)

Bodenbeläge und -aufbauten	
Grafik Absorptionsgrad	Beschreibung und Absorptionswerte
	<p>a Parkett auf Estrich, geklebt, ohne Versiegelung b wie a, versiegelt c Gummibelag, lose aufgelegt</p> <p>Oktav-Mittenfrequenz [Hz] Einzahlangabe 125 250 500 1k 2k 4k NRC α_w</p> <p>a 0,04 0,04 0,06 0,12 0,10 0,17 0,10 0,10 b 0,02 0,03 0,04 0,05 0,05 0,10 0,05 0,05 c 0,04 0,04 0,08 0,12 0,03 0,01 0,05 0,10</p>
	<p>a 10 mm dicker Velours-Teppich, davon Poldicke ca. 5 mm und 5 mm dicker Rücken aus Polyesterfilz b dünner Kokosläufer, lose aufgelegt c Nadelfilz, 7 mm</p> <p>Oktav-Mittenfrequenz [Hz] Einzahlangabe 125 250 500 1k 2k 4k NRC α_w</p> <p>a 0,02 0,04 0,17 0,42 0,76 0,87 0,35 0,25(H) b 0,02 0,03 0,05 0,10 0,27 0,48 0,10 0,10(H) c 0,02 0,04 0,12 0,20 0,36 0,57 0,20 0,20(H)</p>
	<p>a Teppich auf Estrich, 5 mm b wie a, mit 5 mm dicker Filzunterlage c Teppich, lose aufgelegt, 8 mm</p> <p>Oktav-Mittenfrequenz [Hz] Einzahlangabe 125 250 500 1k 2k 4k NRC α_w</p> <p>a 0,04 0,04 0,15 0,29 0,52 0,59 0,25 0,25(H) b 0,07 0,21 0,57 0,68 0,81 0,72 0,55 0,50(H) c 0,04 0,12 0,26 0,49 0,28 0,29 0,30 0,30</p>
	<p>a Hohlraumboden mit Teppich, Akustik-Bodenplatte gelocht, LA = 19,6 % b wie a, mit Hohlraumbedämpfung c wie a, mit Akustikvlies</p> <p>Oktav-Mittenfrequenz [Hz] Einzahlangabe 125 250 500 1k 2k 4k NRC α_w</p> <p>a 0,56 0,54 0,44 0,42 0,55 0,65 0,50 0,45(LH) b 0,72 0,50 0,40 0,43 0,62 0,67 0,50 0,45(LH) c 0,48 0,48 0,44 0,47 0,59 0,65 0,50 0,50(H)</p>

Tabelle 8.3 Schallabsorptionsgrad für flächenhafte Bodenbeläge und Bodenaufbauten

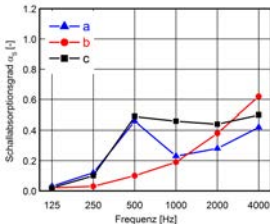
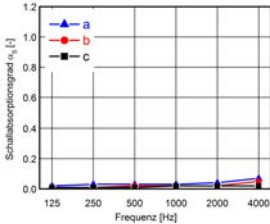
Bodenbeläge und -aufbauten											
Grafik Absorptionsgrad				Beschreibung und Absorptionswerte							
				a		Webteppichboden					
				b		Nadelvliesboden					
				c		flachgewebter Teppichboden					
				Oktav-Mittenfrequenz [Hz]		Einzahlangabe					
				125	250	500	1k	2k	4k	NRC	α_w
a				0,03	0,12	0,46	0,23	0,28	0,42	0,25	0,30
b				0,02	0,03	0,10	0,19	0,38	0,62	0,20	0,20(H)
c				0,02	0,10	0,49	0,46	0,44	0,50	0,35	0,40
				a		Schwerbetonfläche, rau					
				b		Schwerbeton, glatt, ungestrichen					
				c		wie b, gestrichen oder lackiert					
				Oktav-Mittenfrequenz [Hz]		Einzahlangabe					
				125	250	500	1k	2k	4k	NRC	α_w
a				0,02	0,03	0,03	0,03	0,04	0,07	0,05	0,05
b				0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,05	0,00	0,00
c				0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,00	0,00

Tabelle 8.3 (Fortsetzung)

Abbildung 8.2 Teppichboden mit speziellem Akustikrücken
[Quelle: Carpet Concept]



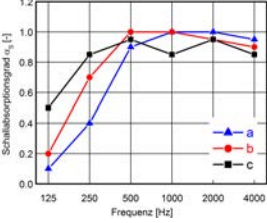
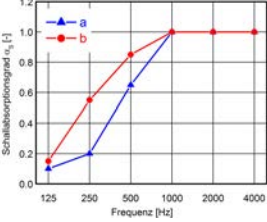
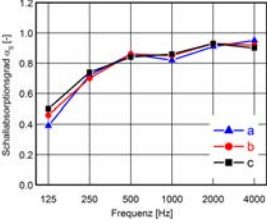
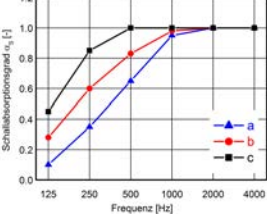
Rasterdecken – Glaswolle / Steinwolle / Mineralwolle	
Grafik Absorptionsgrad	Beschreibung und Absorptionswerte
	<p>a Rasterdecke aus GW mit 20 mm dicken Platten, KH = 50 mm b wie a, KH = 100 mm c wie a, KH = 200 mm</p> <p>Oktav-Mittenfrequenz [Hz] Einzahlangabe 125 250 500 1k 2k 4k NRC α_w</p> <p>a 0,10 0,40 0,90 1,00 1,00 0,95 0,85 0,70(MH) b 0,20 0,70 1,00 1,00 0,95 0,90 0,90 0,95 c 0,50 0,85 0,95 0,85 0,95 0,85 0,90 0,95</p>
	<p>a Rasterdecke aus GW, mit 40 mm dicken Platten, KH = 50 mm b wie a, KH = 200 mm</p> <p>Oktav-Mittenfrequenz [Hz] Einzahlangabe 125 250 500 1k 2k 4k NRC α_w</p> <p>a 0,10 0,20 0,65 1,00 1,00 1,00 0,70 0,50(MH) b 0,15 0,55 0,85 1,00 1,00 1,00 0,85 0,85(H)</p>
	<p>a Rasterdecke aus SW, mit 15 mm dicken Platten, KH = 200 mm b wie a, Plattendicke 20 mm c wie a, Plattendicke 25 mm</p> <p>Oktav-Mittenfrequenz [Hz] Einzahlangabe 125 250 500 1k 2k 4k NRC α_w</p> <p>a 0,39 0,72 0,86 0,82 0,91 0,95 0,85 0,85 b 0,46 0,70 0,86 0,85 0,93 0,92 0,85 0,90 c 0,50 0,74 0,84 0,86 0,93 0,90 0,85 0,90</p>
	<p>a Rasterdecke aus SW, mit 20 mm dicken Platten, KH = 24 mm b wie a, KH = 150 mm c wie a, KH = 200 mm</p> <p>Oktav-Mittenfrequenz [Hz] Einzahlangabe 125 250 500 1k 2k 4k NRC α_w</p> <p>a 0,10 0,35 0,65 0,95 1,00 1,00 0,75 0,65(MH) b 0,28 0,60 0,83 0,98 1,00 1,00 0,85 0,85(H) c 0,45 0,85 1,00 1,00 1,00 1,00 0,95 1,00</p>

Tabelle 8.4 Schallabsorptionsgrad für flächenhafte Schallabsorber für die großflächige Belegung von Decken

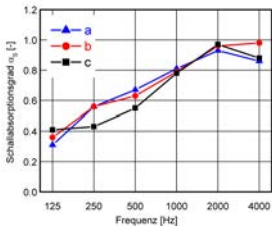
Rasterdecken – Glaswolle / Steinwolle / Mineralwolle																																																				
Grafik Absorptionsgrad			Beschreibung und Absorptionswerte																																																	
			<div>a Rasterdecke aus MW, mit 14 mm dicken Platten, KH = 50 mm</div> <div>b wie a, KH = 185 mm</div> <div>c wie a, KH = 200 mm</div> <table><tr><th rowspan="2"></th><th colspan="6">Oktav-Mittenfrequenz [Hz]</th><th colspan="2">Einzahlangabe</th></tr><tr><th>125</th><th>250</th><th>500</th><th>1k</th><th>2k</th><th>4k</th><th>NRC</th><th>α_w</th></tr><tr><td>a</td><td>0,31</td><td>0,56</td><td>0,67</td><td>0,81</td><td>0,93</td><td>0,86</td><td>0,75</td><td>0,75</td></tr><tr><td>b</td><td>0,36</td><td>0,56</td><td>0,63</td><td>0,79</td><td>0,96</td><td>0,98</td><td>0,75</td><td>0,75(H)</td></tr><tr><td>c</td><td>0,41</td><td>0,43</td><td>0,55</td><td>0,78</td><td>0,97</td><td>0,88</td><td>0,70</td><td>0,65(H)</td></tr></table>							Oktav-Mittenfrequenz [Hz]						Einzahlangabe		125	250	500	1k	2k	4k	NRC	α_w	a	0,31	0,56	0,67	0,81	0,93	0,86	0,75	0,75	b	0,36	0,56	0,63	0,79	0,96	0,98	0,75	0,75(H)	c	0,41	0,43	0,55	0,78	0,97	0,88	0,70	0,65(H)
	Oktav-Mittenfrequenz [Hz]						Einzahlangabe																																													
	125	250	500	1k	2k	4k	NRC	α_w																																												
a	0,31	0,56	0,67	0,81	0,93	0,86	0,75	0,75																																												
b	0,36	0,56	0,63	0,79	0,96	0,98	0,75	0,75(H)																																												
c	0,41	0,43	0,55	0,78	0,97	0,88	0,70	0,65(H)																																												

Tabelle 8.4 (Fortsetzung)

Abbildung 8.3 Rasterdecke aus Steinwolle als Kasten in Raummitte



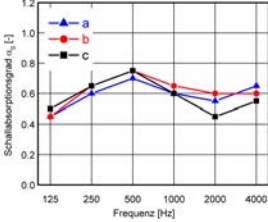
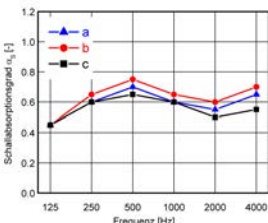
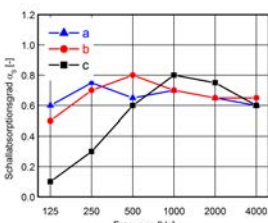
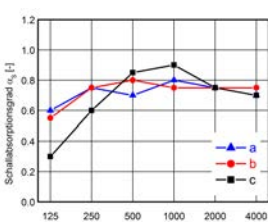
Rasterdecke – gelochter Gipskarton																																												
Grafik Absorptionsgrad			Beschreibung und Absorptionswerte																																									
			<p>a Rasterdecke 8/18 Rundlochung, LA = 15,5 %, KH = 200 mm, Akustikvlies, ohne MW-Auflage</p> <p>b wie a, 12/25 Rundlochung, LA = 18,1 %</p> <p>c wie a, 20/42 Rundlochung, LA = 17,8 %</p> <p>Oktav-Mittenfrequenz [Hz] Einzahlangabe</p> <table><tr><td></td><td>125</td><td>250</td><td>500</td><td>1k</td><td>2k</td><td>4k</td><td>NRC</td><td>α_w</td></tr><tr><td>a</td><td>0,45</td><td>0,60</td><td>0,70</td><td>0,60</td><td>0,55</td><td>0,65</td><td>0,60</td><td>0,60</td></tr><tr><td>b</td><td>0,45</td><td>0,65</td><td>0,75</td><td>0,65</td><td>0,60</td><td>0,60</td><td>0,65</td><td>0,65</td></tr><tr><td>c</td><td>0,50</td><td>0,65</td><td>0,75</td><td>0,60</td><td>0,45</td><td>0,55</td><td>0,60</td><td>0,55(L)</td></tr></table>							125	250	500	1k	2k	4k	NRC	α_w	a	0,45	0,60	0,70	0,60	0,55	0,65	0,60	0,60	b	0,45	0,65	0,75	0,65	0,60	0,60	0,65	0,65	c	0,50	0,65	0,75	0,60	0,45	0,55	0,60	0,55(L)
	125	250	500	1k	2k	4k	NRC	α_w																																				
a	0,45	0,60	0,70	0,60	0,55	0,65	0,60	0,60																																				
b	0,45	0,65	0,75	0,65	0,60	0,60	0,65	0,65																																				
c	0,50	0,65	0,75	0,60	0,45	0,55	0,60	0,55(L)																																				
			<p>a Rasterdecke 8/18 Rundlochung, LA = 15,5 %, KH = 200 mm, Akustikvlies, ohne MW-Auflage</p> <p>b wie a, 8/18 Quadratlochung, LA = 19,8 %</p> <p>c wie a, 8/12/50 Rundlochung, LA = 13,1 %</p> <p>Oktav-Mittenfrequenz [Hz] Einzahlangabe</p> <table><tr><td></td><td>125</td><td>250</td><td>500</td><td>1k</td><td>2k</td><td>4k</td><td>NRC</td><td>α_w</td></tr><tr><td>a</td><td>0,45</td><td>0,60</td><td>0,70</td><td>0,60</td><td>0,55</td><td>0,65</td><td>0,60</td><td>0,60</td></tr><tr><td>b</td><td>0,45</td><td>0,65</td><td>0,75</td><td>0,65</td><td>0,60</td><td>0,70</td><td>0,65</td><td>0,65</td></tr><tr><td>c</td><td>0,45</td><td>0,60</td><td>0,65</td><td>0,60</td><td>0,50</td><td>0,55</td><td>0,60</td><td>0,60</td></tr></table>							125	250	500	1k	2k	4k	NRC	α_w	a	0,45	0,60	0,70	0,60	0,55	0,65	0,60	0,60	b	0,45	0,65	0,75	0,65	0,60	0,70	0,65	0,65	c	0,45	0,60	0,65	0,60	0,50	0,55	0,60	0,60
	125	250	500	1k	2k	4k	NRC	α_w																																				
a	0,45	0,60	0,70	0,60	0,55	0,65	0,60	0,60																																				
b	0,45	0,65	0,75	0,65	0,60	0,70	0,65	0,65																																				
c	0,45	0,60	0,65	0,60	0,50	0,55	0,60	0,60																																				
			<p>a Rasterdecke 12/25 Quadratlochung, LA = 23 %, KH = 400 mm, Akustikvlies, ohne MW-Auflage</p> <p>b wie a, KH = 200 mm</p> <p>c wie a, KH = 65 mm</p> <p>Oktav-Mittenfrequenz [Hz] Einzahlangabe</p> <table><tr><td></td><td>125</td><td>250</td><td>500</td><td>1k</td><td>2k</td><td>4k</td><td>NRC</td><td>α_w</td></tr><tr><td>a</td><td>0,60</td><td>0,75</td><td>0,65</td><td>0,70</td><td>0,65</td><td>0,60</td><td>0,70</td><td>0,70(L)</td></tr><tr><td>b</td><td>0,50</td><td>0,70</td><td>0,80</td><td>0,70</td><td>0,65</td><td>0,65</td><td>0,70</td><td>0,70</td></tr><tr><td>c</td><td>0,10</td><td>0,30</td><td>0,60</td><td>0,80</td><td>0,75</td><td>0,60</td><td>0,60</td><td>0,60</td></tr></table>							125	250	500	1k	2k	4k	NRC	α_w	a	0,60	0,75	0,65	0,70	0,65	0,60	0,70	0,70(L)	b	0,50	0,70	0,80	0,70	0,65	0,65	0,70	0,70	c	0,10	0,30	0,60	0,80	0,75	0,60	0,60	0,60
	125	250	500	1k	2k	4k	NRC	α_w																																				
a	0,60	0,75	0,65	0,70	0,65	0,60	0,70	0,70(L)																																				
b	0,50	0,70	0,80	0,70	0,65	0,65	0,70	0,70																																				
c	0,10	0,30	0,60	0,80	0,75	0,60	0,60	0,60																																				
			<p>a Rasterdecke 12/25 Quadratlochung, LA = 23 %, KH = 400 mm, Akustikvlies, 20 mm MW-Auflage</p> <p>b wie a, KH = 200 mm</p> <p>c wie a, KH = 65 mm</p> <p>Oktav-Mittenfrequenz [Hz] Einzahlangabe</p> <table><tr><td></td><td>125</td><td>250</td><td>500</td><td>1k</td><td>2k</td><td>4k</td><td>NRC</td><td>α_w</td></tr><tr><td>a</td><td>0,60</td><td>0,75</td><td>0,70</td><td>0,80</td><td>0,75</td><td>0,70</td><td>0,75</td><td>0,75</td></tr><tr><td>b</td><td>0,55</td><td>0,75</td><td>0,80</td><td>0,75</td><td>0,75</td><td>0,75</td><td>0,75</td><td>0,80</td></tr><tr><td>c</td><td>0,30</td><td>0,60</td><td>0,85</td><td>0,90</td><td>0,75</td><td>0,70</td><td>0,80</td><td>0,80</td></tr></table>							125	250	500	1k	2k	4k	NRC	α_w	a	0,60	0,75	0,70	0,80	0,75	0,70	0,75	0,75	b	0,55	0,75	0,80	0,75	0,75	0,75	0,75	0,80	c	0,30	0,60	0,85	0,90	0,75	0,70	0,80	0,80
	125	250	500	1k	2k	4k	NRC	α_w																																				
a	0,60	0,75	0,70	0,80	0,75	0,70	0,75	0,75																																				
b	0,55	0,75	0,80	0,75	0,75	0,75	0,75	0,80																																				
c	0,30	0,60	0,85	0,90	0,75	0,70	0,80	0,80																																				

Tabelle 8.4 (Fortsetzung)

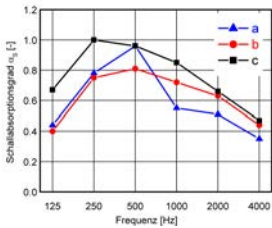
Rasterdecke – gelochter Gipskarton											
Grafik Absorptionsgrad				Beschreibung und Absorptionswerte							
				a Rasterdecke 8/18 Rundlochung mit Akustikvlies, KH = 200 mm, ohne MW-Auflage							
				b wie a, 20 mm MW							
				c wie a, 50 mm MW							
				Oktav-Mittenfrequenz [Hz]						Einzahlangabe	
				125	250	500	1k	2k	4k	NRC	α_w
a				0,44	0,78	0,96	0,55	0,51	0,35	0,70	0,50(LM)
b				0,40	0,75	0,81	0,72	0,63	0,44	0,75	0,65(L)
c				0,67	1,00	0,96	0,85	0,66	0,47	0,85	0,65(LM)

Tabelle 8.4 (Fortsetzung)

Abbildung 8.4 Gelochte Gipskarton-Decke als Rasterdecke



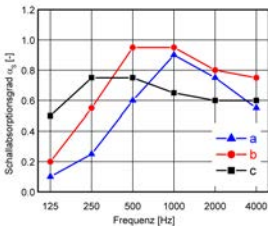
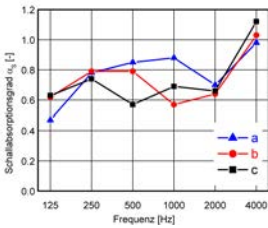
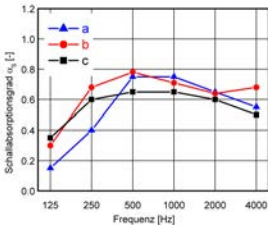
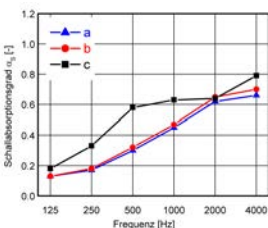
Deckenputzsysteme																																														
Grafik Absorptionsgrad	Beschreibung und Absorptionswerte																																													
	<p>a 15 mm Blähglasgranulat-Platte mit feinkörniger Beschichtung, KH = 42 mm, ohne MW</p> <p>b wie a, MW 20 mm</p> <p>c wie b, KH = 260 mm, ohne MW</p> <table><tr><th>Oktav-Mittenfrequenz [Hz]</th><th>125</th><th>250</th><th>500</th><th>1k</th><th>2k</th><th>4k</th><th colspan="2">Einzahlangabe</th></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><th>NRC</th><th>α_w</th></tr><tr><td>a</td><td>0,10</td><td>0,25</td><td>0,60</td><td>0,90</td><td>0,75</td><td>0,55</td><td>0,65</td><td>0,55(M)</td></tr><tr><td>b</td><td>0,20</td><td>0,55</td><td>0,95</td><td>0,95</td><td>0,80</td><td>0,75</td><td>0,80</td><td>0,80</td></tr><tr><td>c</td><td>0,50</td><td>0,75</td><td>0,75</td><td>0,65</td><td>0,60</td><td>0,60</td><td>0,70</td><td>0,65(L)</td></tr></table>	Oktav-Mittenfrequenz [Hz]	125	250	500	1k	2k	4k	Einzahlangabe									NRC	α_w	a	0,10	0,25	0,60	0,90	0,75	0,55	0,65	0,55(M)	b	0,20	0,55	0,95	0,95	0,80	0,75	0,80	0,80	c	0,50	0,75	0,75	0,65	0,60	0,60	0,70	0,65(L)
Oktav-Mittenfrequenz [Hz]	125	250	500	1k	2k	4k	Einzahlangabe																																							
							NRC	α_w																																						
a	0,10	0,25	0,60	0,90	0,75	0,55	0,65	0,55(M)																																						
b	0,20	0,55	0,95	0,95	0,80	0,75	0,80	0,80																																						
c	0,50	0,75	0,75	0,65	0,60	0,60	0,70	0,65(L)																																						
	<p>a 15 mm dicke Platte aus Blähglas, 3 mm Akustikspritzputz, KH = 55 mm, 40 mm MW</p> <p>b wie a, KH = 95 mm</p> <p>c wie a, KH = 415 mm</p> <table><tr><th>Oktav-Mittenfrequenz [Hz]</th><th>125</th><th>250</th><th>500</th><th>1k</th><th>2k</th><th>4k</th><th colspan="2">Einzahlangabe</th></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><th>NRC</th><th>α_w</th></tr><tr><td>a</td><td>0,47</td><td>0,78</td><td>0,85</td><td>0,88</td><td>0,70</td><td>0,98</td><td>0,80</td><td>0,80(H)</td></tr><tr><td>b</td><td>0,62</td><td>0,79</td><td>0,79</td><td>0,57</td><td>0,64</td><td>1,03</td><td>0,70</td><td>0,65(LH)</td></tr><tr><td>c</td><td>0,63</td><td>0,74</td><td>0,57</td><td>0,69</td><td>0,66</td><td>1,12</td><td>0,65</td><td>0,65(LH)</td></tr></table>	Oktav-Mittenfrequenz [Hz]	125	250	500	1k	2k	4k	Einzahlangabe									NRC	α_w	a	0,47	0,78	0,85	0,88	0,70	0,98	0,80	0,80(H)	b	0,62	0,79	0,79	0,57	0,64	1,03	0,70	0,65(LH)	c	0,63	0,74	0,57	0,69	0,66	1,12	0,65	0,65(LH)
Oktav-Mittenfrequenz [Hz]	125	250	500	1k	2k	4k	Einzahlangabe																																							
							NRC	α_w																																						
a	0,47	0,78	0,85	0,88	0,70	0,98	0,80	0,80(H)																																						
b	0,62	0,79	0,79	0,57	0,64	1,03	0,70	0,65(LH)																																						
c	0,63	0,74	0,57	0,69	0,66	1,12	0,65	0,65(LH)																																						
	<p>a leichte, hochporöse MW-Platte, werkseitig vorbeschichtet als Putzträgerplatte mit offenporöser Akustikputzbeschichtung, direkt auf Untergrund angebracht, 30 mm MW-Platte</p> <p>b wie a, MW-Platte 40 mm</p> <p>c wie a, MW-Platte 60 mm</p> <table><tr><th>Oktav-Mittenfrequenz [Hz]</th><th>125</th><th>250</th><th>500</th><th>1k</th><th>2k</th><th>4k</th><th colspan="2">Einzahlangabe</th></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><th>NRC</th><th>α_w</th></tr><tr><td>a</td><td>0,15</td><td>0,40</td><td>0,75</td><td>0,75</td><td>0,65</td><td>0,55</td><td>0,65</td><td>0,65</td></tr><tr><td>b</td><td>0,30</td><td>0,68</td><td>0,78</td><td>0,71</td><td>0,64</td><td>0,68</td><td>0,70</td><td>0,70</td></tr><tr><td>c</td><td>0,35</td><td>0,60</td><td>0,65</td><td>0,65</td><td>0,60</td><td>0,50</td><td>0,65</td><td>0,65</td></tr></table>	Oktav-Mittenfrequenz [Hz]	125	250	500	1k	2k	4k	Einzahlangabe									NRC	α_w	a	0,15	0,40	0,75	0,75	0,65	0,55	0,65	0,65	b	0,30	0,68	0,78	0,71	0,64	0,68	0,70	0,70	c	0,35	0,60	0,65	0,65	0,60	0,50	0,65	0,65
Oktav-Mittenfrequenz [Hz]	125	250	500	1k	2k	4k	Einzahlangabe																																							
							NRC	α_w																																						
a	0,15	0,40	0,75	0,75	0,65	0,55	0,65	0,65																																						
b	0,30	0,68	0,78	0,71	0,64	0,68	0,70	0,70																																						
c	0,35	0,60	0,65	0,65	0,60	0,50	0,65	0,65																																						
	<p>a Akustik-/Feuchtraumputz, 10 mm</p> <p>b wie a, 12 mm</p> <p>c wie a, 20 mm</p> <table><tr><th>Oktav-Mittenfrequenz [Hz]</th><th>125</th><th>250</th><th>500</th><th>1k</th><th>2k</th><th>4k</th><th colspan="2">Einzahlangabe</th></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><th>NRC</th><th>α_w</th></tr><tr><td>a</td><td>0,13</td><td>0,17</td><td>0,30</td><td>0,45</td><td>0,62</td><td>0,66</td><td>0,40</td><td>0,35(H)</td></tr><tr><td>b</td><td>0,13</td><td>0,18</td><td>0,32</td><td>0,47</td><td>0,65</td><td>0,70</td><td>0,40</td><td>0,40(H)</td></tr><tr><td>c</td><td>0,18</td><td>0,33</td><td>0,58</td><td>0,63</td><td>0,64</td><td>0,79</td><td>0,55</td><td>0,60(H)</td></tr></table>	Oktav-Mittenfrequenz [Hz]	125	250	500	1k	2k	4k	Einzahlangabe									NRC	α_w	a	0,13	0,17	0,30	0,45	0,62	0,66	0,40	0,35(H)	b	0,13	0,18	0,32	0,47	0,65	0,70	0,40	0,40(H)	c	0,18	0,33	0,58	0,63	0,64	0,79	0,55	0,60(H)
Oktav-Mittenfrequenz [Hz]	125	250	500	1k	2k	4k	Einzahlangabe																																							
							NRC	α_w																																						
a	0,13	0,17	0,30	0,45	0,62	0,66	0,40	0,35(H)																																						
b	0,13	0,18	0,32	0,47	0,65	0,70	0,40	0,40(H)																																						
c	0,18	0,33	0,58	0,63	0,64	0,79	0,55	0,60(H)																																						

Tabelle 8.4 (Fortsetzung)

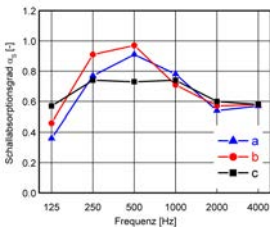
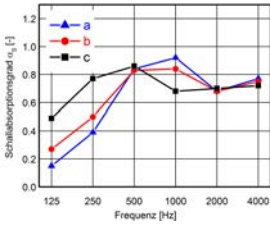
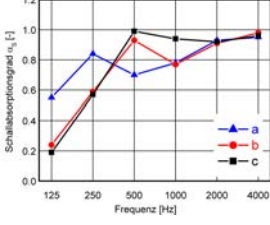
Deckensputzsysteme																																								
Grafik Absorptionsgrad	Beschreibung und Absorptionswerte																																							
	<p>a Akustikdecke 12-20/66 Lochplatte, LA = 19,6 % mit Endbeschichtung aus Akustikputz ohne Luftabstand</p> <p>b wie a, 100 mm Luftabstand</p> <p>c wie a, 200 mm Luftabstand</p> <table><tr><th colspan="2">Oktav-Mittenfrequenz [Hz]</th><th colspan="2">Einzahlangabe</th></tr><tr><th>125</th><th>250</th><th>500</th><th>1k</th><th>2k</th><th>4k</th><th>NRC</th><th>alpha_w</th></tr><tr><td>a</td><td>0,36</td><td>0,77</td><td>0,91</td><td>0,78</td><td>0,54</td><td>0,57</td><td>0,75</td><td>0,65(LM)</td></tr><tr><td>b</td><td>0,46</td><td>0,91</td><td>0,97</td><td>0,71</td><td>0,57</td><td>0,58</td><td>0,80</td><td>0,65(LM)</td></tr><tr><td>c</td><td>0,57</td><td>0,74</td><td>0,73</td><td>0,74</td><td>0,60</td><td>0,58</td><td>0,70</td><td>0,70(L)</td></tr></table>	Oktav-Mittenfrequenz [Hz]		Einzahlangabe		125	250	500	1k	2k	4k	NRC	alpha_w	a	0,36	0,77	0,91	0,78	0,54	0,57	0,75	0,65(LM)	b	0,46	0,91	0,97	0,71	0,57	0,58	0,80	0,65(LM)	c	0,57	0,74	0,73	0,74	0,60	0,58	0,70	0,70(L)
Oktav-Mittenfrequenz [Hz]		Einzahlangabe																																						
125	250	500	1k	2k	4k	NRC	alpha_w																																	
a	0,36	0,77	0,91	0,78	0,54	0,57	0,75	0,65(LM)																																
b	0,46	0,91	0,97	0,71	0,57	0,58	0,80	0,65(LM)																																
c	0,57	0,74	0,73	0,74	0,60	0,58	0,70	0,70(L)																																
	<p>a Akustikdecke bestehend aus geblättem Glas-Recyclinggranulat als Grundplatte und einer Akustikbeschichtung, KH = 50 mm</p> <p>b wie a, KH = 100 mm</p> <p>c wie a, KH = 200 mm</p> <table><tr><th colspan="2">Oktav-Mittenfrequenz [Hz]</th><th colspan="2">Einzahlangabe</th></tr><tr><th>125</th><th>250</th><th>500</th><th>1k</th><th>2k</th><th>4k</th><th>NRC</th><th>alpha_w</th></tr><tr><td>a</td><td>0,15</td><td>0,39</td><td>0,84</td><td>0,92</td><td>0,68</td><td>0,77</td><td>0,70</td><td>0,70</td></tr><tr><td>b</td><td>0,27</td><td>0,50</td><td>0,83</td><td>0,84</td><td>0,68</td><td>0,75</td><td>0,75</td><td>0,70</td></tr><tr><td>c</td><td>0,49</td><td>0,77</td><td>0,86</td><td>0,68</td><td>0,70</td><td>0,72</td><td>0,75</td><td>0,75</td></tr></table>	Oktav-Mittenfrequenz [Hz]		Einzahlangabe		125	250	500	1k	2k	4k	NRC	alpha_w	a	0,15	0,39	0,84	0,92	0,68	0,77	0,70	0,70	b	0,27	0,50	0,83	0,84	0,68	0,75	0,75	0,70	c	0,49	0,77	0,86	0,68	0,70	0,72	0,75	0,75
Oktav-Mittenfrequenz [Hz]		Einzahlangabe																																						
125	250	500	1k	2k	4k	NRC	alpha_w																																	
a	0,15	0,39	0,84	0,92	0,68	0,77	0,70	0,70																																
b	0,27	0,50	0,83	0,84	0,68	0,75	0,75	0,70																																
c	0,49	0,77	0,86	0,68	0,70	0,72	0,75	0,75																																
	<p>a Akustikdecke bestehend aus geblättem Glas-Recyclinggranulat als Grundplatte und einer 2 mm Akustikbeschichtung, Dicke 27 mm, KH = 260 mm</p> <p>b wie a, KH = 127 mm ohne MW</p> <p>c wie a, KH = 57 mm, mit 20 mm MW</p> <table><tr><th colspan="2">Oktav-Mittenfrequenz [Hz]</th><th colspan="2">Einzahlangabe</th></tr><tr><th>125</th><th>250</th><th>500</th><th>1k</th><th>2k</th><th>4k</th><th>NRC</th><th>alpha_w</th></tr><tr><td>a</td><td>0,55</td><td>0,84</td><td>0,70</td><td>0,78</td><td>0,93</td><td>0,95</td><td>0,80</td><td>0,80(LH)</td></tr><tr><td>b</td><td>0,24</td><td>0,59</td><td>0,93</td><td>0,77</td><td>0,91</td><td>0,98</td><td>0,80</td><td>0,80(H)</td></tr><tr><td>c</td><td>0,19</td><td>0,57</td><td>0,99</td><td>0,94</td><td>0,92</td><td>0,96</td><td>0,85</td><td>0,85</td></tr></table>	Oktav-Mittenfrequenz [Hz]		Einzahlangabe		125	250	500	1k	2k	4k	NRC	alpha_w	a	0,55	0,84	0,70	0,78	0,93	0,95	0,80	0,80(LH)	b	0,24	0,59	0,93	0,77	0,91	0,98	0,80	0,80(H)	c	0,19	0,57	0,99	0,94	0,92	0,96	0,85	0,85
Oktav-Mittenfrequenz [Hz]		Einzahlangabe																																						
125	250	500	1k	2k	4k	NRC	alpha_w																																	
a	0,55	0,84	0,70	0,78	0,93	0,95	0,80	0,80(LH)																																
b	0,24	0,59	0,93	0,77	0,91	0,98	0,80	0,80(H)																																
c	0,19	0,57	0,99	0,94	0,92	0,96	0,85	0,85																																

Tabelle 8.4 (Fortsetzung)

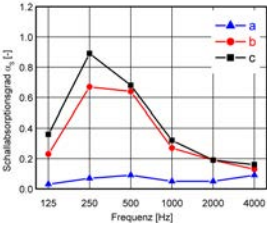
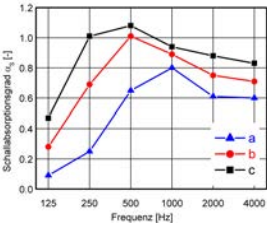
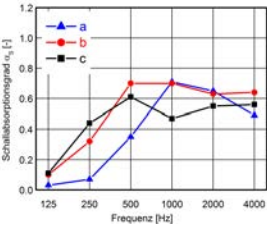
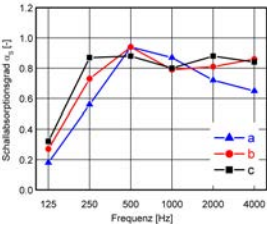
Folienspanndecke	
Grafik Absorptionsgrad	Beschreibung und Absorptionswerte
	<p>a Spanndecke unperforiert, KH = 100 mm, ohne Füllung im Hohlraum</p> <p>b wie a, 40 mm MW an Rohdecke</p> <p>c wie a, 70 mm MW an Rohdecke</p> <p>Oktav-Mittenfrequenz [Hz] Einzahlangabe 125 250 500 1k 2k 4k NRC α_w</p> <p>a 0,03 0,07 0,09 0,05 0,05 0,09 0,05 0,10</p> <p>b 0,23 0,67 0,64 0,27 0,19 0,13 0,45 0,25(LM)</p> <p>c 0,36 0,89 0,68 0,32 0,19 0,16 0,50 0,25(LM)</p>
	<p>a Spanndecke mikroperforiert, KH = 100 mm</p> <p>b wie a, 40 mm MW an Rohdecke</p> <p>c wie a, 80 mm MW an Rohdecke</p> <p>Oktav-Mittenfrequenz [Hz] Einzahlangabe 125 250 500 1k 2k 4k NRC α_w</p> <p>a 0,09 0,25 0,65 0,80 0,61 0,60 0,60 0,55(M)</p> <p>b 0,28 0,69 1,01 0,89 0,75 0,71 0,85 0,80</p> <p>c 0,47 1,01 1,08 0,94 0,88 0,83 1,00 0,95(L)</p>
	<p>a Spanndecke mikroperforiert, KH = 50 mm</p> <p>b wie a, KH = 130 mm</p> <p>c wie a, KH = 200 mm</p> <p>Oktav-Mittenfrequenz [Hz] Einzahlangabe 125 250 500 1k 2k 4k NRC α_w</p> <p>a 0,03 0,07 0,35 0,71 0,65 0,49 0,45 0,35(MH)</p> <p>b 0,10 0,32 0,70 0,70 0,63 0,64 0,60 0,60</p> <p>c 0,11 0,44 0,61 0,47 0,55 0,56 0,50 0,55</p>
	<p>a Spanndecke mikroperforiert, KH = 50 mm, 40 mm MW</p> <p>b wie a, KH = 130 mm, MW 40 mm</p> <p>c wie a, KH = 200 mm, MW 40 mm</p> <p>Oktav-Mittenfrequenz [Hz] Einzahlangabe 125 250 500 1k 2k 4k NRC α_w</p> <p>a 0,18 0,56 0,94 0,87 0,72 0,65 0,75 0,75</p> <p>b 0,27 0,73 0,94 0,79 0,81 0,86 0,80 0,85</p> <p>c 0,32 0,87 0,88 0,80 0,88 0,84 0,85 0,85</p>

Tabelle 8.4 (Fortsetzung)

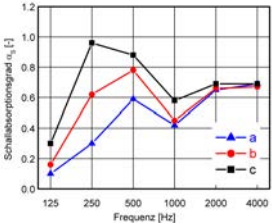
Folienspanndecke	
Grafik Absorptionsgrad	Beschreibung und Absorptionswerte
	a doppelagige Spanndecke, erste mikroperforiert, zweite unperforiert mit einer Distanz von 20 mm, KH = 100 mm
	b wie a, MW an Begrenzungsfläche 20 mm
	c wie a, MW an Begrenzungsfläche 40 mm
	Oktav-Mittenfrequenz [Hz] Einzulangabe
	125 250 500 1k 2k 4k NRC α_w
	a 0,10 0,30 0,59 0,42 0,65 0,69 0,50 0,50(H)
	b 0,16 0,62 0,78 0,45 0,66 0,67 0,65 0,55(LM)
	c 0,30 0,96 0,88 0,58 0,69 0,69 0,80 0,70(L)

Tabelle 8.4 (Fortsetzung)

Abbildung 8.5 Mikroperforierte Folienspanndecke in Rahmen
[Quelle:
BARRISOL S.A.S.]



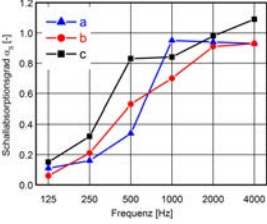
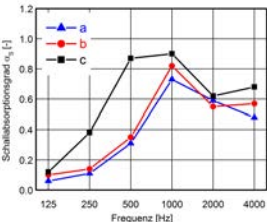
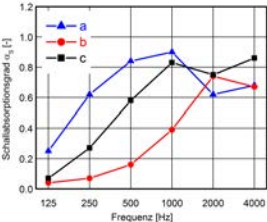
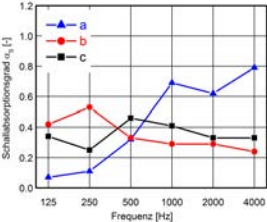
Schaumstoffe	
Grafik Absorptionsgrad	Beschreibung und Absorptionswerte
	<p>a Polyurethanschaum 30 mm dick, vor starrer Wand b wie a, mit 15 mm aufkaschiertem Textilgewebe c elastischer Polyurethanschaum, Pyramidenform, insgesamt 100 mm, aufgeklebt</p> <p>Oktav-Mittenfrequenz [Hz] Einzahlangabe 125 250 500 1k 2k 4k NRC α_w a 0,11 0,16 0,34 0,95 0,94 0,93 0,60 0,45(MH) b 0,06 0,21 0,53 0,70 0,91 0,93 0,60 0,50(H) c 0,15 0,32 0,83 0,84 0,98 1,09 0,75 0,60(MH)</p>
	<p>a Polystyrolschaum, 10 mm dicke Lochplatte, nicht durchgelocht, HR leer, WA 40 mm b wie a, elektrisch geschnitten c wie a, mechanisch geschnitten</p> <p>Oktav-Mittenfrequenz [Hz] Einzahlangabe 125 250 500 1k 2k 4k NRC α_w a 0,06 0,11 0,31 0,73 0,59 0,48 0,45 0,35(MH) b 0,10 0,14 0,35 0,82 0,55 0,57 0,45 0,40(MH) c 0,12 0,38 0,87 0,90 0,62 0,68 0,70 0,65(M)</p>
	<p>a Polystyrolschaum, 15 mm dicke Lochplatte, nicht durchgelocht, HR mit MW gefüllt, WA 40 mm b wie a, Dicke 20 mm, direkt auf Wand c wie b, HR leer, WA 40 mm</p> <p>Oktav-Mittenfrequenz [Hz] Einzahlangabe 125 250 500 1k 2k 4k NRC α_w a 0,25 0,62 0,84 0,90 0,62 0,68 0,75 0,70 b 0,04 0,07 0,16 0,39 0,74 0,67 0,35 0,25(H) c 0,07 0,27 0,58 0,83 0,75 0,86 0,60 0,55(MH)</p>
	<p>a Polystyrolschaum, 20 mm dicke Kreuznutplatte, HR leer, WA 20 mm b Polystyrolschaum, 25 mm dicke Schichtplatte, HR leer, WA 250 mm c wie b, auf 20 mm dicker MW-Matte, WA 250 mm</p> <p>Oktav-Mittenfrequenz [Hz] Einzahlangabe 125 250 500 1k 2k 4k NRC α_w a 0,07 0,11 0,32 0,69 0,62 0,79 0,45 0,35(MH) b 0,42 0,53 0,33 0,29 0,29 0,24 0,35 0,35(L) c 0,34 0,25 0,46 0,41 0,33 0,33 0,35 0,40</p>

Tabelle 8.5 Schallabsorptionsgrad für modulare Schallabsorber für die Belegung von Decken und Wänden

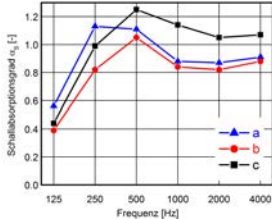
Schaumstoffe										
Grafik Absorptionsgrad			Beschreibung und Absorptionswerte							
			a Polyesterplatte und Wollstoffbezug, Plattendicke ca. 150 mm, mit ca. 40 mm PET-Vlies gefüllt							
			b wie a, ohne PET-Vlies							
			c wie a mit Textilstoffbezug zweilagig							
			Oktav-Mittenfrequenz [Hz]		Einzahlangabe					
			125	250	500	1k	2k	4k	NRC	α_w
a			0,56	1,13	1,11	0,88	0,87	0,91	1,00	0,90(L)
b			0,39	0,82	1,05	0,84	0,82	0,88	0,90	0,85
c			0,44	0,99	1,25	1,14	1,05	1,07	1,10	1,00

Tabelle 8.5 (Fortsetzung)

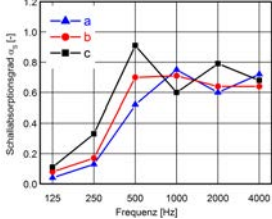
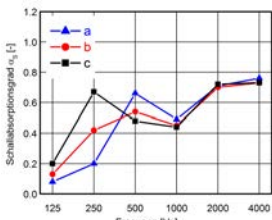
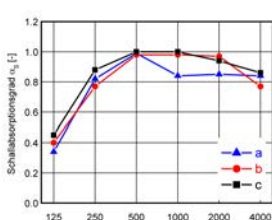
Holzwolle-Leichtbauplatten																																								
Grafik Absorptionsgrad	Beschreibung und Absorptionswerte																																							
	<p>a Holzvolle-Leichtbauplatte KH = 25 mm, direkt auf Wand</p> <p>b wie a, KH = 35 mm</p> <p>c wie a, KH = 50 mm</p> <table><tr><th colspan="2">Oktav-Mittenfrequenz [Hz]</th><th colspan="2">Einzahlangabe</th></tr><tr><th>125</th><th>250</th><th>500</th><th>1k</th><th>2k</th><th>4k</th><th>NRC</th><th>α_w</th></tr><tr><td>a</td><td>0,04</td><td>0,13</td><td>0,52</td><td>0,75</td><td>0,60</td><td>0,72</td><td>0,50</td><td>0,45(MH)</td></tr><tr><td>b</td><td>0,08</td><td>0,17</td><td>0,70</td><td>0,71</td><td>0,64</td><td>0,64</td><td>0,55</td><td>0,45(MH)</td></tr><tr><td>c</td><td>0,11</td><td>0,33</td><td>0,91</td><td>0,60</td><td>0,79</td><td>0,68</td><td>0,65</td><td>0,60(M)</td></tr></table>	Oktav-Mittenfrequenz [Hz]		Einzahlangabe		125	250	500	1k	2k	4k	NRC	α_w	a	0,04	0,13	0,52	0,75	0,60	0,72	0,50	0,45(MH)	b	0,08	0,17	0,70	0,71	0,64	0,64	0,55	0,45(MH)	c	0,11	0,33	0,91	0,60	0,79	0,68	0,65	0,60(M)
Oktav-Mittenfrequenz [Hz]		Einzahlangabe																																						
125	250	500	1k	2k	4k	NRC	α_w																																	
a	0,04	0,13	0,52	0,75	0,60	0,72	0,50	0,45(MH)																																
b	0,08	0,17	0,70	0,71	0,64	0,64	0,55	0,45(MH)																																
c	0,11	0,33	0,91	0,60	0,79	0,68	0,65	0,60(M)																																
	<p>a Holzvolle-Leichtbauplatte 25 mm dick, HR leer, WA 24 mm</p> <p>b wie a, WA 50 mm</p> <p>c wie a, WA 80 mm</p> <table><tr><th colspan="2">Oktav-Mittenfrequenz [Hz]</th><th colspan="2">Einzahlangabe</th></tr><tr><th>125</th><th>250</th><th>500</th><th>1k</th><th>2k</th><th>4k</th><th>NRC</th><th>α_w</th></tr><tr><td>a</td><td>0,08</td><td>0,20</td><td>0,66</td><td>0,49</td><td>0,70</td><td>0,76</td><td>0,50</td><td>0,50(H)</td></tr><tr><td>b</td><td>0,13</td><td>0,42</td><td>0,54</td><td>0,45</td><td>0,70</td><td>0,73</td><td>0,55</td><td>0,55(H)</td></tr><tr><td>c</td><td>0,20</td><td>0,67</td><td>0,48</td><td>0,44</td><td>0,72</td><td>0,73</td><td>0,60</td><td>0,55(LH)</td></tr></table>	Oktav-Mittenfrequenz [Hz]		Einzahlangabe		125	250	500	1k	2k	4k	NRC	α_w	a	0,08	0,20	0,66	0,49	0,70	0,76	0,50	0,50(H)	b	0,13	0,42	0,54	0,45	0,70	0,73	0,55	0,55(H)	c	0,20	0,67	0,48	0,44	0,72	0,73	0,60	0,55(LH)
Oktav-Mittenfrequenz [Hz]		Einzahlangabe																																						
125	250	500	1k	2k	4k	NRC	α_w																																	
a	0,08	0,20	0,66	0,49	0,70	0,76	0,50	0,50(H)																																
b	0,13	0,42	0,54	0,45	0,70	0,73	0,55	0,55(H)																																
c	0,20	0,67	0,48	0,44	0,72	0,73	0,60	0,55(LH)																																
	<p>a Holzvolle-Leichtbauplatte 25 mm dick, in 0,15 mm Folie, 50 mm MW, KH = 75 mm</p> <p>b wie a, Dicke 35 mm, KH = 85 mm</p> <p>c wie a, Dicke 50 mm, KH = 105 mm</p> <table><tr><th colspan="2">Oktav-Mittenfrequenz [Hz]</th><th colspan="2">Einzahlangabe</th></tr><tr><th>125</th><th>250</th><th>500</th><th>1k</th><th>2k</th><th>4k</th><th>NRC</th><th>α_w</th></tr><tr><td>a</td><td>0,34</td><td>0,82</td><td>0,99</td><td>0,84</td><td>0,85</td><td>0,84</td><td>0,90</td><td>0,90</td></tr><tr><td>b</td><td>0,40</td><td>0,77</td><td>0,98</td><td>0,98</td><td>0,97</td><td>0,77</td><td>0,95</td><td>0,95</td></tr><tr><td>c</td><td>0,45</td><td>0,88</td><td>1,00</td><td>1,00</td><td>0,94</td><td>0,86</td><td>0,95</td><td>1,00</td></tr></table>	Oktav-Mittenfrequenz [Hz]		Einzahlangabe		125	250	500	1k	2k	4k	NRC	α_w	a	0,34	0,82	0,99	0,84	0,85	0,84	0,90	0,90	b	0,40	0,77	0,98	0,98	0,97	0,77	0,95	0,95	c	0,45	0,88	1,00	1,00	0,94	0,86	0,95	1,00
Oktav-Mittenfrequenz [Hz]		Einzahlangabe																																						
125	250	500	1k	2k	4k	NRC	α_w																																	
a	0,34	0,82	0,99	0,84	0,85	0,84	0,90	0,90																																
b	0,40	0,77	0,98	0,98	0,97	0,77	0,95	0,95																																
c	0,45	0,88	1,00	1,00	0,94	0,86	0,95	1,00																																

Tabelle 8.5 (Fortsetzung)

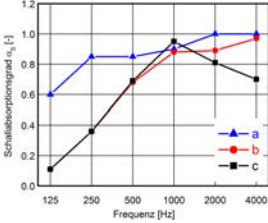
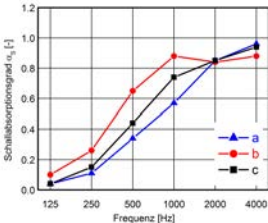
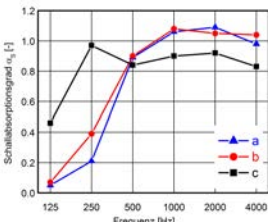
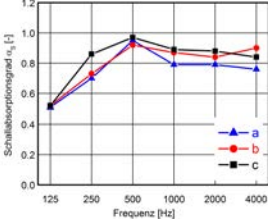
Mineralwolle																																					
Grafik Absorptionsgrad	Beschreibung und Absorptionswerte																																				
	<p>a 19 mm dicke vliesbeschichtete MW-Matte vor 181 mm dickem HR</p> <p>b 40 mm dicke MW-Matte ($\rho = 20 \text{ kg/m}^3$), ohne Lochblechabdeckung</p> <p>c wie b, mit Lochblechabdeckung (LA = 18 %)</p> <p>Oktav-Mittenfrequenz [Hz] Einzahlangabe</p> <table><tr><td></td><td>125</td><td>250</td><td>500</td><td>1k</td><td>2k</td><td>4k</td><td>NRC</td><td>α_w</td></tr><tr><td>a</td><td>0,60</td><td>0,85</td><td>0,85</td><td>0,90</td><td>1,00</td><td>1,00</td><td>0,90</td><td>0,90</td></tr><tr><td>b</td><td>0,11</td><td>0,36</td><td>0,68</td><td>0,88</td><td>0,89</td><td>0,97</td><td>0,70</td><td>0,65(MH)</td></tr><tr><td>c</td><td>0,11</td><td>0,36</td><td>0,69</td><td>0,95</td><td>0,81</td><td>0,70</td><td>0,70</td><td>0,65(M)</td></tr></table>		125	250	500	1k	2k	4k	NRC	α_w	a	0,60	0,85	0,85	0,90	1,00	1,00	0,90	0,90	b	0,11	0,36	0,68	0,88	0,89	0,97	0,70	0,65(MH)	c	0,11	0,36	0,69	0,95	0,81	0,70	0,70	0,65(M)
	125	250	500	1k	2k	4k	NRC	α_w																													
a	0,60	0,85	0,85	0,90	1,00	1,00	0,90	0,90																													
b	0,11	0,36	0,68	0,88	0,89	0,97	0,70	0,65(MH)																													
c	0,11	0,36	0,69	0,95	0,81	0,70	0,70	0,65(M)																													
	<p>a leichte MW-Matte, 12 mm dicke Platte ($\rho = 160 \text{ kg/m}^3$), direkt auf Wand</p> <p>b wie a, mit Raufaserstruktur, WA 50 mm</p> <p>c 15 mm dicke MW-Matte ($\rho = 200 \text{ kg/m}^3$) mit gestrichener, geprägter Oberfläche, direkt auf Wand</p> <p>Oktav-Mittenfrequenz [Hz] Einzahlangabe</p> <table><tr><td></td><td>125</td><td>250</td><td>500</td><td>1k</td><td>2k</td><td>4k</td><td>NRC</td><td>α_w</td></tr><tr><td>a</td><td>0,04</td><td>0,11</td><td>0,34</td><td>0,57</td><td>0,85</td><td>0,96</td><td>0,45</td><td>0,35(H)</td></tr><tr><td>b</td><td>0,10</td><td>0,26</td><td>0,65</td><td>0,88</td><td>0,84</td><td>0,88</td><td>0,65</td><td>0,55(MH)</td></tr><tr><td>c</td><td>0,04</td><td>0,15</td><td>0,44</td><td>0,74</td><td>0,85</td><td>0,94</td><td>0,55</td><td>0,45(MH)</td></tr></table>		125	250	500	1k	2k	4k	NRC	α_w	a	0,04	0,11	0,34	0,57	0,85	0,96	0,45	0,35(H)	b	0,10	0,26	0,65	0,88	0,84	0,88	0,65	0,55(MH)	c	0,04	0,15	0,44	0,74	0,85	0,94	0,55	0,45(MH)
	125	250	500	1k	2k	4k	NRC	α_w																													
a	0,04	0,11	0,34	0,57	0,85	0,96	0,45	0,35(H)																													
b	0,10	0,26	0,65	0,88	0,84	0,88	0,65	0,55(MH)																													
c	0,04	0,15	0,44	0,74	0,85	0,94	0,55	0,45(MH)																													
	<p>a 20 mm dicke MW-Matte ($\rho = 130 \text{ kg/m}^3$), mit Schneeflockenmuster, direkt auf Wand</p> <p>b wie a, WA 25 mm</p> <p>c wie a, WA 200 mm</p> <p>Oktav-Mittenfrequenz [Hz] Einzahlangabe</p> <table><tr><td></td><td>125</td><td>250</td><td>500</td><td>1k</td><td>2k</td><td>4k</td><td>NRC</td><td>α_w</td></tr><tr><td>a</td><td>0,05</td><td>0,21</td><td>0,89</td><td>1,06</td><td>1,09</td><td>0,98</td><td>0,80</td><td>0,50(MH)</td></tr><tr><td>b</td><td>0,07</td><td>0,39</td><td>0,90</td><td>1,08</td><td>1,05</td><td>1,04</td><td>0,85</td><td>0,70(MH)</td></tr><tr><td>c</td><td>0,46</td><td>0,97</td><td>0,84</td><td>0,90</td><td>0,92</td><td>0,83</td><td>0,90</td><td>0,90(L)</td></tr></table>		125	250	500	1k	2k	4k	NRC	α_w	a	0,05	0,21	0,89	1,06	1,09	0,98	0,80	0,50(MH)	b	0,07	0,39	0,90	1,08	1,05	1,04	0,85	0,70(MH)	c	0,46	0,97	0,84	0,90	0,92	0,83	0,90	0,90(L)
	125	250	500	1k	2k	4k	NRC	α_w																													
a	0,05	0,21	0,89	1,06	1,09	0,98	0,80	0,50(MH)																													
b	0,07	0,39	0,90	1,08	1,05	1,04	0,85	0,70(MH)																													
c	0,46	0,97	0,84	0,90	0,92	0,83	0,90	0,90(L)																													
	<p>a 30 mm dicke MW-Matte ($\rho = 160 \text{ kg/m}^3$) unter Faserzement-Wellplatte (7 mm dick)</p> <p>b wie a, Dicke 40 mm ($\rho = 136 \text{ kg/m}^3$)</p> <p>c wie a, Dicke 50 mm ($\rho = 120 \text{ kg/m}^3$)</p> <p>Oktav-Mittenfrequenz [Hz] Einzahlangabe</p> <table><tr><td></td><td>125</td><td>250</td><td>500</td><td>1k</td><td>2k</td><td>4k</td><td>NRC</td><td>α_w</td></tr><tr><td>a</td><td>0,51</td><td>0,70</td><td>0,95</td><td>0,79</td><td>0,79</td><td>0,76</td><td>0,80</td><td>0,85</td></tr><tr><td>b</td><td>0,52</td><td>0,73</td><td>0,92</td><td>0,87</td><td>0,84</td><td>0,90</td><td>0,85</td><td>0,90</td></tr><tr><td>c</td><td>0,52</td><td>0,86</td><td>0,97</td><td>0,89</td><td>0,88</td><td>0,84</td><td>0,90</td><td>0,95</td></tr></table>		125	250	500	1k	2k	4k	NRC	α_w	a	0,51	0,70	0,95	0,79	0,79	0,76	0,80	0,85	b	0,52	0,73	0,92	0,87	0,84	0,90	0,85	0,90	c	0,52	0,86	0,97	0,89	0,88	0,84	0,90	0,95
	125	250	500	1k	2k	4k	NRC	α_w																													
a	0,51	0,70	0,95	0,79	0,79	0,76	0,80	0,85																													
b	0,52	0,73	0,92	0,87	0,84	0,90	0,85	0,90																													
c	0,52	0,86	0,97	0,89	0,88	0,84	0,90	0,95																													

Tabelle 8.5 (Fortsetzung)

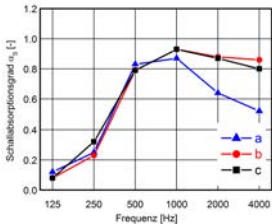
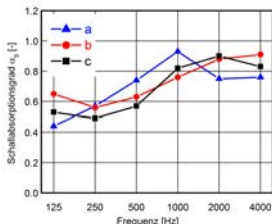
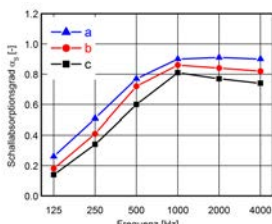
Mineralfaser																																								
Grafik Absorptionsgrad	Beschreibung und Absorptionswerte																																							
	<div><div>a16 mm dicke MW-Platte ($\rho = 325 \text{ kg/m}^3$) mit gerippter, gestrichener Oberfläche, WA ca. 8 mm</div><div>b19 mm dicke MW-Platte ($\rho = 350 \text{ kg/m}^3$) mit streifenputzähnlicher, gestrichener Oberfläche, WA ca. 8 mm</div><div>cwie b, mit travertinähnlicher, gestrichener Oberfläche, WA ca. 8 mm</div></div> <table><tr><th colspan="2">Oktav-Mittenfrequenz [Hz]</th><th colspan="2">Einzahlangabe</th></tr><tr><th>125</th><th>250</th><th>500</th><th>1k</th><th>2k</th><th>4k</th><th>NRC</th><th>α_w</th></tr><tr><td>a</td><td>0,12</td><td>0,25</td><td>0,83</td><td>0,87</td><td>0,64</td><td>0,52</td><td>0,65</td><td>0,55(M)</td></tr><tr><td>b</td><td>0,08</td><td>0,23</td><td>0,79</td><td>0,93</td><td>0,88</td><td>0,86</td><td>0,70</td><td>0,55(MH)</td></tr><tr><td>c</td><td>0,08</td><td>0,32</td><td>0,79</td><td>0,93</td><td>0,87</td><td>0,80</td><td>0,75</td><td>0,60(MH)</td></tr></table>	Oktav-Mittenfrequenz [Hz]		Einzahlangabe		125	250	500	1k	2k	4k	NRC	α_w	a	0,12	0,25	0,83	0,87	0,64	0,52	0,65	0,55(M)	b	0,08	0,23	0,79	0,93	0,88	0,86	0,70	0,55(MH)	c	0,08	0,32	0,79	0,93	0,87	0,80	0,75	0,60(MH)
Oktav-Mittenfrequenz [Hz]		Einzahlangabe																																						
125	250	500	1k	2k	4k	NRC	α_w																																	
a	0,12	0,25	0,83	0,87	0,64	0,52	0,65	0,55(M)																																
b	0,08	0,23	0,79	0,93	0,88	0,86	0,70	0,55(MH)																																
c	0,08	0,32	0,79	0,93	0,87	0,80	0,75	0,60(MH)																																
	<div><div>a16 mm dicke MW-Platte ($\rho = 325 \text{ kg/m}^3$) mit gerippter, gestrichener Oberfläche, WA 400 mm</div><div>b19 mm dicke MW-Platte ($\rho = 350 \text{ kg/m}^3$) mit streifenputzähnlicher, gestrichener Oberfläche, WA 400 mm</div><div>cwie b, mit travertinähnlicher, gestrichener Oberfläche, WA 400 mm</div></div> <table><tr><th colspan="2">Oktav-Mittenfrequenz [Hz]</th><th colspan="2">Einzahlangabe</th></tr><tr><th>125</th><th>250</th><th>500</th><th>1k</th><th>2k</th><th>4k</th><th>NRC</th><th>α_w</th></tr><tr><td>a</td><td>0,44</td><td>0,57</td><td>0,74</td><td>0,93</td><td>0,75</td><td>0,76</td><td>0,75</td><td>0,75</td></tr><tr><td>b</td><td>0,65</td><td>0,56</td><td>0,63</td><td>0,76</td><td>0,88</td><td>0,91</td><td>0,70</td><td>0,75(H)</td></tr><tr><td>c</td><td>0,53</td><td>0,49</td><td>0,57</td><td>0,82</td><td>0,90</td><td>0,83</td><td>0,70</td><td>0,75</td></tr></table>	Oktav-Mittenfrequenz [Hz]		Einzahlangabe		125	250	500	1k	2k	4k	NRC	α_w	a	0,44	0,57	0,74	0,93	0,75	0,76	0,75	0,75	b	0,65	0,56	0,63	0,76	0,88	0,91	0,70	0,75(H)	c	0,53	0,49	0,57	0,82	0,90	0,83	0,70	0,75
Oktav-Mittenfrequenz [Hz]		Einzahlangabe																																						
125	250	500	1k	2k	4k	NRC	α_w																																	
a	0,44	0,57	0,74	0,93	0,75	0,76	0,75	0,75																																
b	0,65	0,56	0,63	0,76	0,88	0,91	0,70	0,75(H)																																
c	0,53	0,49	0,57	0,82	0,90	0,83	0,70	0,75																																
	<div><div>a50 mm dicke SW-Lamellen mit weiß gespritztem Mineralvlies, seitlich mit Metallkanten eingefasst, Lamellenhöhe 300 mm, 900 mm HR zur Decke, Lamellenabstand 200 mm</div><div>bwie a, Lamellenabstand 300 mm</div><div>cwie a, Lamellenabstand 400 mm</div></div> <table><tr><th colspan="2">Oktav-Mittenfrequenz [Hz]</th><th colspan="2">Einzahlangabe</th></tr><tr><th>125</th><th>250</th><th>500</th><th>1k</th><th>2k</th><th>4k</th><th>NRC</th><th>α_w</th></tr><tr><td>a</td><td>0,26</td><td>0,51</td><td>0,77</td><td>0,90</td><td>0,91</td><td>0,90</td><td>0,75</td><td>0,75(H)</td></tr><tr><td>b</td><td>0,18</td><td>0,41</td><td>0,72</td><td>0,86</td><td>0,84</td><td>0,82</td><td>0,70</td><td>0,70</td></tr><tr><td>c</td><td>0,14</td><td>0,34</td><td>0,60</td><td>0,81</td><td>0,77</td><td>0,74</td><td>0,65</td><td>0,60(H)</td></tr></table>	Oktav-Mittenfrequenz [Hz]		Einzahlangabe		125	250	500	1k	2k	4k	NRC	α_w	a	0,26	0,51	0,77	0,90	0,91	0,90	0,75	0,75(H)	b	0,18	0,41	0,72	0,86	0,84	0,82	0,70	0,70	c	0,14	0,34	0,60	0,81	0,77	0,74	0,65	0,60(H)
Oktav-Mittenfrequenz [Hz]		Einzahlangabe																																						
125	250	500	1k	2k	4k	NRC	α_w																																	
a	0,26	0,51	0,77	0,90	0,91	0,90	0,75	0,75(H)																																
b	0,18	0,41	0,72	0,86	0,84	0,82	0,70	0,70																																
c	0,14	0,34	0,60	0,81	0,77	0,74	0,65	0,60(H)																																

Tabelle 8.5 (Fortsetzung)

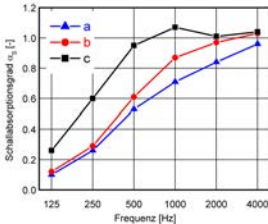
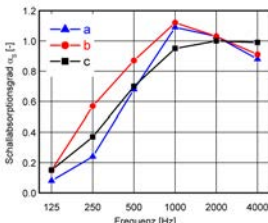
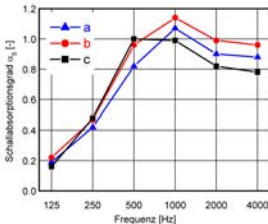
Glasfaser / Glaswolle																																													
Grafik Absorptionsgrad	Beschreibung und Absorptionswerte																																												
	<p>a 20 mm dicke GW-Platte, einseitig mit Glasvlies kaschiert, $\Xi \geq 11$ Pa s/m, direkt an Wand angebracht.</p> <p>b wie a, Lamellenabstand 300 mm</p> <p>c wie a, Lamellenabstand 400 mm</p> <table><tr><th rowspan="2"></th><th colspan="6">Oktav-Mittenfrequenz [Hz]</th><th colspan="2">Einzahlangabe</th></tr><tr><th>125</th><th>250</th><th>500</th><th>1k</th><th>2k</th><th>4k</th><th>NRC</th><th>α_w</th></tr><tr><td>a</td><td>0,10</td><td>0,26</td><td>0,53</td><td>0,71</td><td>0,84</td><td>0,96</td><td>0,60</td><td>0,55(H)</td></tr><tr><td>b</td><td>0,12</td><td>0,29</td><td>0,61</td><td>0,87</td><td>0,97</td><td>1,03</td><td>0,70</td><td>0,60(MH)</td></tr><tr><td>c</td><td>0,26</td><td>0,60</td><td>0,95</td><td>1,07</td><td>1,01</td><td>1,04</td><td>0,90</td><td>0,90</td></tr></table>		Oktav-Mittenfrequenz [Hz]						Einzahlangabe		125	250	500	1k	2k	4k	NRC	α_w	a	0,10	0,26	0,53	0,71	0,84	0,96	0,60	0,55(H)	b	0,12	0,29	0,61	0,87	0,97	1,03	0,70	0,60(MH)	c	0,26	0,60	0,95	1,07	1,01	1,04	0,90	0,90
	Oktav-Mittenfrequenz [Hz]						Einzahlangabe																																						
	125	250	500	1k	2k	4k	NRC	α_w																																					
a	0,10	0,26	0,53	0,71	0,84	0,96	0,60	0,55(H)																																					
b	0,12	0,29	0,61	0,87	0,97	1,03	0,70	0,60(MH)																																					
c	0,26	0,60	0,95	1,07	1,01	1,04	0,90	0,90																																					
	<p>a 20 mm dicke GW-Platte, ca. $\rho = 150$ kg/m³, auf 2,40 mm Lattenrost, HR hinter den Platten leer</p> <p>b wie a, mit Glasfaser-Baufilz ausgefüllt</p> <p>c wie b, mit ca. $\rho = 100$ kg/m³</p> <table><tr><th rowspan="2"></th><th colspan="6">Oktav-Mittenfrequenz [Hz]</th><th colspan="2">Einzahlangabe</th></tr><tr><th>125</th><th>250</th><th>500</th><th>1k</th><th>2k</th><th>4k</th><th>NRC</th><th>α_w</th></tr><tr><td>a</td><td>0,08</td><td>0,24</td><td>0,68</td><td>1,09</td><td>1,03</td><td>0,88</td><td>0,75</td><td>0,55(MH)</td></tr><tr><td>b</td><td>0,15</td><td>0,57</td><td>0,87</td><td>1,12</td><td>1,03</td><td>0,91</td><td>0,70</td><td>0,60(MH)</td></tr><tr><td>c</td><td>0,15</td><td>0,37</td><td>0,70</td><td>0,95</td><td>1,00</td><td>0,99</td><td>0,75</td><td>0,65(MH)</td></tr></table>		Oktav-Mittenfrequenz [Hz]						Einzahlangabe		125	250	500	1k	2k	4k	NRC	α_w	a	0,08	0,24	0,68	1,09	1,03	0,88	0,75	0,55(MH)	b	0,15	0,57	0,87	1,12	1,03	0,91	0,70	0,60(MH)	c	0,15	0,37	0,70	0,95	1,00	0,99	0,75	0,65(MH)
	Oktav-Mittenfrequenz [Hz]						Einzahlangabe																																						
	125	250	500	1k	2k	4k	NRC	α_w																																					
a	0,08	0,24	0,68	1,09	1,03	0,88	0,75	0,55(MH)																																					
b	0,15	0,57	0,87	1,12	1,03	0,91	0,70	0,60(MH)																																					
c	0,15	0,37	0,70	0,95	1,00	0,99	0,75	0,65(MH)																																					
	<p>a 30 mm dicke GW-Platte, ca. $\rho = 50$ kg/m³, ohne WA, ohne Abdeckung</p> <p>b wie a, abgedeckt mit Lattengitter, Lattenbreite 10 mm, Lattentiefe 15 mm, Lattenabstand 30 mm</p> <p>c 40 mm dicke GW-Platte auf 40 mm dickem Lattenrost, abgedeckt mit Aluminiumlochblech, Lochdurchmesser 6 mm, Lochabstand 13 mm</p> <table><tr><th rowspan="2"></th><th colspan="6">Oktav-Mittenfrequenz [Hz]</th><th colspan="2">Einzahlangabe</th></tr><tr><th>125</th><th>250</th><th>500</th><th>1k</th><th>2k</th><th>4k</th><th>NRC</th><th>α_w</th></tr><tr><td>a</td><td>0,19</td><td>0,42</td><td>0,82</td><td>1,07</td><td>0,90</td><td>0,88</td><td>0,80</td><td>0,70(MH)</td></tr><tr><td>b</td><td>0,22</td><td>0,47</td><td>0,96</td><td>1,14</td><td>0,99</td><td>0,96</td><td>0,90</td><td>0,75(MH)</td></tr><tr><td>c</td><td>0,16</td><td>0,48</td><td>1,00</td><td>0,99</td><td>0,82</td><td>0,78</td><td>0,80</td><td>0,80</td></tr></table>		Oktav-Mittenfrequenz [Hz]						Einzahlangabe		125	250	500	1k	2k	4k	NRC	α_w	a	0,19	0,42	0,82	1,07	0,90	0,88	0,80	0,70(MH)	b	0,22	0,47	0,96	1,14	0,99	0,96	0,90	0,75(MH)	c	0,16	0,48	1,00	0,99	0,82	0,78	0,80	0,80
	Oktav-Mittenfrequenz [Hz]						Einzahlangabe																																						
	125	250	500	1k	2k	4k	NRC	α_w																																					
a	0,19	0,42	0,82	1,07	0,90	0,88	0,80	0,70(MH)																																					
b	0,22	0,47	0,96	1,14	0,99	0,96	0,90	0,75(MH)																																					
c	0,16	0,48	1,00	0,99	0,82	0,78	0,80	0,80																																					

Tabelle 8.5 (Fortsetzung)

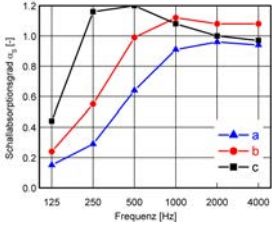
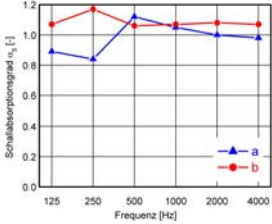
Melaminharzschaum	
<div><div>Grafik Absorptionsgrad</div><div></div></div>	<div><div>Beschreibung und Absorptionswerte</div><div><div>a</div><div>Melaminharz-Schaumstoff Maße (H×B×T): 1000×500×30 mm, $\rho = 9 \text{ kg/m}^3$, direkt auf Wand</div><div>b</div><div>wie a, Maße (H×B×T): 1000×500×50 mm</div><div>c</div><div>wie a, Maße (H×B×T): 1000×500×100 mm</div></div><div><div>Oktav-Mittenfrequenz [Hz]</div><div>125 250 500 1k 2k 4k</div><div>Einzahlangabe</div><div>NRC α_w</div><div>a 0,15 0,29 0,64 0,91 0,96 0,94 0,70 0,60(MH)</div><div>b 0,24 0,55 0,99 1,12 1,08 1,08 0,95 0,85(H)</div><div>c 0,44 1,16 1,20 1,08 1,00 0,97 1,10 1,00</div></div></div>
<div><div></div><div></div></div>	<div><div>a</div><div>Melaminharz-Schaumstoff mit Resonanzabsorber, 120 mm, direkt auf Wand</div><div>b</div><div>wie a, 240 mm</div></div> <div><div>Oktav-Mittenfrequenz [Hz]</div><div>125 250 500 1k 2k 4k</div><div>Einzahlangabe</div><div>NRC α_w</div><div>a 0,89 0,84 1,12 1,05 1,00 0,98 1,00 1,00</div><div>b 1,07 1,17 1,06 1,07 1,08 1,07 1,10 1,00</div></div>

Tabelle 8.5 (Fortsetzung)

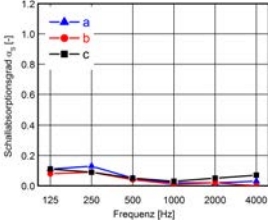
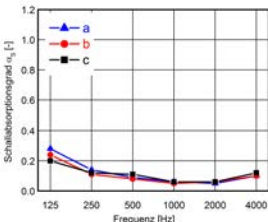
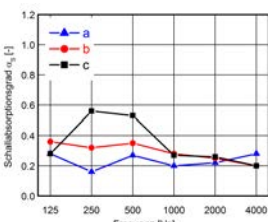
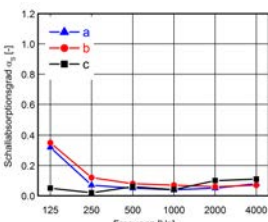
Geschlossene Gipskartondecke																																											
Grafik Absorptionsgrad	Beschreibung und Absorptionswerte																																										
	<p>a 9,5 mm dicke GK-Platte, ungelocht, KH = 109,5 mm</p> <p>b wie a, KH = 209,5 mm</p> <p>c wie a, KH = 409,5 mm</p> <table><tr><th rowspan="2">Oktav-Mittenfrequenz [Hz]</th><th colspan="6">Einzahlangabe</th></tr><tr><th>125</th><th>250</th><th>500</th><th>1k</th><th>2k</th><th>4k</th><th>NRC</th><th>α_w</th></tr><tr><td>a</td><td>0,11</td><td>0,13</td><td>0,05</td><td>0,02</td><td>0,02</td><td>0,03</td><td>0,05</td><td>0,05(L)</td></tr><tr><td>b</td><td>0,08</td><td>0,09</td><td>0,04</td><td>0,01</td><td>0,02</td><td>0,00</td><td>0,05</td><td>0,05(L)</td></tr><tr><td>c</td><td>0,11</td><td>0,09</td><td>0,05</td><td>0,03</td><td>0,05</td><td>0,07</td><td>0,05</td><td>0,05(L)</td></tr></table>	Oktav-Mittenfrequenz [Hz]	Einzahlangabe						125	250	500	1k	2k	4k	NRC	α_w	a	0,11	0,13	0,05	0,02	0,02	0,03	0,05	0,05(L)	b	0,08	0,09	0,04	0,01	0,02	0,00	0,05	0,05(L)	c	0,11	0,09	0,05	0,03	0,05	0,07	0,05	0,05(L)
Oktav-Mittenfrequenz [Hz]	Einzahlangabe																																										
	125	250	500	1k	2k	4k	NRC	α_w																																			
a	0,11	0,13	0,05	0,02	0,02	0,03	0,05	0,05(L)																																			
b	0,08	0,09	0,04	0,01	0,02	0,00	0,05	0,05(L)																																			
c	0,11	0,09	0,05	0,03	0,05	0,07	0,05	0,05(L)																																			
	<p>a 9,5 mm dicke GK-Platte, ungelocht, mit HR-Dämpfung, KH = 109,5 mm</p> <p>b wie a, KH = 209,5 mm</p> <p>c wie a, KH = 409,5 mm</p> <table><tr><th rowspan="2">Oktav-Mittenfrequenz [Hz]</th><th colspan="6">Einzahlangabe</th></tr><tr><th>125</th><th>250</th><th>500</th><th>1k</th><th>2k</th><th>4k</th><th>NRC</th><th>α_w</th></tr><tr><td>a</td><td>0,28</td><td>0,14</td><td>0,09</td><td>0,06</td><td>0,05</td><td>0,10</td><td>0,10</td><td>0,10(L)</td></tr><tr><td>b</td><td>0,24</td><td>0,11</td><td>0,08</td><td>0,05</td><td>0,06</td><td>0,10</td><td>0,10</td><td>0,10</td></tr><tr><td>c</td><td>0,20</td><td>0,12</td><td>0,11</td><td>0,06</td><td>0,06</td><td>0,12</td><td>0,10</td><td>0,10</td></tr></table>	Oktav-Mittenfrequenz [Hz]	Einzahlangabe						125	250	500	1k	2k	4k	NRC	α_w	a	0,28	0,14	0,09	0,06	0,05	0,10	0,10	0,10(L)	b	0,24	0,11	0,08	0,05	0,06	0,10	0,10	0,10	c	0,20	0,12	0,11	0,06	0,06	0,12	0,10	0,10
Oktav-Mittenfrequenz [Hz]	Einzahlangabe																																										
	125	250	500	1k	2k	4k	NRC	α_w																																			
a	0,28	0,14	0,09	0,06	0,05	0,10	0,10	0,10(L)																																			
b	0,24	0,11	0,08	0,05	0,06	0,10	0,10	0,10																																			
c	0,20	0,12	0,11	0,06	0,06	0,12	0,10	0,10																																			
	<p>a 12,5 mm dicke GK-Platte, 600 mm breit, mit 20 mm Basaltwollmatte aufgelegt, KH = 692,5 mm</p> <p>b wie a, 300 mm breite Platte, Abstand der Platten 30 mm, KH = 722,5 mm</p> <p>c wie b, KH = 122,5 mm</p> <table><tr><th rowspan="2">Oktav-Mittenfrequenz [Hz]</th><th colspan="6">Einzahlangabe</th></tr><tr><th>125</th><th>250</th><th>500</th><th>1k</th><th>2k</th><th>4k</th><th>NRC</th><th>α_w</th></tr><tr><td>a</td><td>0,28</td><td>0,16</td><td>0,27</td><td>0,20</td><td>0,22</td><td>0,28</td><td>0,20</td><td>0,25</td></tr><tr><td>b</td><td>0,36</td><td>0,32</td><td>0,35</td><td>0,28</td><td>0,25</td><td>0,20</td><td>0,30</td><td>0,30</td></tr><tr><td>c</td><td>0,28</td><td>0,56</td><td>0,53</td><td>0,27</td><td>0,26</td><td>0,20</td><td>0,40</td><td>0,30(LM)</td></tr></table>	Oktav-Mittenfrequenz [Hz]	Einzahlangabe						125	250	500	1k	2k	4k	NRC	α_w	a	0,28	0,16	0,27	0,20	0,22	0,28	0,20	0,25	b	0,36	0,32	0,35	0,28	0,25	0,20	0,30	0,30	c	0,28	0,56	0,53	0,27	0,26	0,20	0,40	0,30(LM)
Oktav-Mittenfrequenz [Hz]	Einzahlangabe																																										
	125	250	500	1k	2k	4k	NRC	α_w																																			
a	0,28	0,16	0,27	0,20	0,22	0,28	0,20	0,25																																			
b	0,36	0,32	0,35	0,28	0,25	0,20	0,30	0,30																																			
c	0,28	0,56	0,53	0,27	0,26	0,20	0,40	0,30(LM)																																			
	<p>a 9,5 mm dicke GK-Verbundplatte, ungelocht; ohne MW, KH = 59,5 mm</p> <p>b wie a, KH = 59,5 mm, HR mit MW gefüllt</p> <p>c wie b, 12,5 mm Dicke, KH = 662,5 mm, ohne MW</p> <table><tr><th rowspan="2">Oktav-Mittenfrequenz [Hz]</th><th colspan="6">Einzahlangabe</th></tr><tr><th>125</th><th>250</th><th>500</th><th>1k</th><th>2k</th><th>4k</th><th>NRC</th><th>α_w</th></tr><tr><td>a</td><td>0,32</td><td>0,07</td><td>0,05</td><td>0,04</td><td>0,05</td><td>0,08</td><td>0,05</td><td>0,05</td></tr><tr><td>b</td><td>0,35</td><td>0,12</td><td>0,08</td><td>0,07</td><td>0,06</td><td>0,07</td><td>0,10</td><td>0,10</td></tr><tr><td>c</td><td>0,05</td><td>0,02</td><td>0,06</td><td>0,04</td><td>0,10</td><td>0,11</td><td>0,05</td><td>0,10</td></tr></table>	Oktav-Mittenfrequenz [Hz]	Einzahlangabe						125	250	500	1k	2k	4k	NRC	α_w	a	0,32	0,07	0,05	0,04	0,05	0,08	0,05	0,05	b	0,35	0,12	0,08	0,07	0,06	0,07	0,10	0,10	c	0,05	0,02	0,06	0,04	0,10	0,11	0,05	0,10
Oktav-Mittenfrequenz [Hz]	Einzahlangabe																																										
	125	250	500	1k	2k	4k	NRC	α_w																																			
a	0,32	0,07	0,05	0,04	0,05	0,08	0,05	0,05																																			
b	0,35	0,12	0,08	0,07	0,06	0,07	0,10	0,10																																			
c	0,05	0,02	0,06	0,04	0,10	0,11	0,05	0,10																																			

Tabelle 8.6 Schallabsorptionsgrad für weitere Materialien an Decken und Wänden

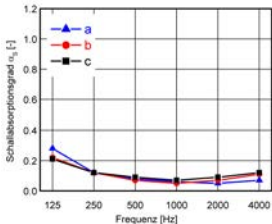
Geschlossene Gipskartondecke																																																				
Grafik Absorptionsgrad			Beschreibung und Absorptionswerte																																																	
			<p>a 12,5 mm dicke geschlossene GK-Platte, 40 mm MW-Auflage, KH = 112,5 mm</p> <p>b wie a, KH = 212,5 mm</p> <p>c wie a, KH = 412,5 mm</p> <table><tr><th rowspan="2"></th><th colspan="6">Oktav-Mittenfrequenz [Hz]</th><th colspan="2">Einzahlangabe</th></tr><tr><th>125</th><th>250</th><th>500</th><th>1k</th><th>2k</th><th>4k</th><th>NRC</th><th>α_w</th></tr><tr><td>a</td><td>0,28</td><td>0,12</td><td>0,08</td><td>0,06</td><td>0,05</td><td>0,07</td><td>0,10</td><td>0,10</td></tr><tr><td>b</td><td>0,22</td><td>0,12</td><td>0,07</td><td>0,05</td><td>0,07</td><td>0,11</td><td>0,10</td><td>0,05(L)</td></tr><tr><td>c</td><td>0,21</td><td>0,12</td><td>0,09</td><td>0,07</td><td>0,09</td><td>0,12</td><td>0,10</td><td>0,10</td></tr></table>							Oktav-Mittenfrequenz [Hz]						Einzahlangabe		125	250	500	1k	2k	4k	NRC	α_w	a	0,28	0,12	0,08	0,06	0,05	0,07	0,10	0,10	b	0,22	0,12	0,07	0,05	0,07	0,11	0,10	0,05(L)	c	0,21	0,12	0,09	0,07	0,09	0,12	0,10	0,10
	Oktav-Mittenfrequenz [Hz]						Einzahlangabe																																													
	125	250	500	1k	2k	4k	NRC	α_w																																												
a	0,28	0,12	0,08	0,06	0,05	0,07	0,10	0,10																																												
b	0,22	0,12	0,07	0,05	0,07	0,11	0,10	0,05(L)																																												
c	0,21	0,12	0,09	0,07	0,09	0,12	0,10	0,10																																												

Tabelle 8.6 (Fortsetzung)

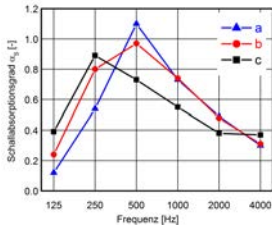
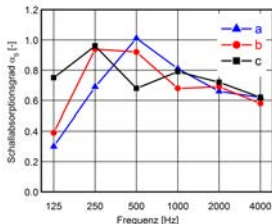
Perforierte Gipskarton-Platten																																													
Grafik Absorptionsgrad	Beschreibung und Absorptionswerte																																												
	<p>a 9,5 mm dicke GK-Schlitzplatte, LA = 8 %, Faservlies und 30 mm MW-Matte, $\rho = 35 \text{ kg/m}^3$, $\Xi = 7,5 \cdot 10^3 \text{ Pa} \cdot \text{s/m}^2$, WA 20 mm, KH = 59,5 mm</p> <p>b wie a, WA 70 mm, KH = 109,5 mm</p> <p>c wie a, WA 170 mm, KH = 209,5 mm</p> <table><tr><th colspan="7">Oktav-Mittenfrequenz [Hz]</th><th colspan="2">Einzahlangabe</th></tr><tr><th>125</th><th>250</th><th>500</th><th>1k</th><th>2k</th><th>4k</th><th>NRC</th><th>α_w</th></tr><tr><td>a</td><td>0,12</td><td>0,54</td><td>1,10</td><td>0,73</td><td>0,49</td><td>0,30</td><td>0,70</td><td>0,50(LM)</td></tr><tr><td>b</td><td>0,24</td><td>0,80</td><td>0,97</td><td>0,74</td><td>0,48</td><td>0,31</td><td>0,75</td><td>0,50(LM)</td></tr><tr><td>c</td><td>0,39</td><td>0,89</td><td>0,73</td><td>0,55</td><td>0,38</td><td>0,37</td><td>0,65</td><td>0,45(LM)</td></tr></table>	Oktav-Mittenfrequenz [Hz]							Einzahlangabe		125	250	500	1k	2k	4k	NRC	α_w	a	0,12	0,54	1,10	0,73	0,49	0,30	0,70	0,50(LM)	b	0,24	0,80	0,97	0,74	0,48	0,31	0,75	0,50(LM)	c	0,39	0,89	0,73	0,55	0,38	0,37	0,65	0,45(LM)
Oktav-Mittenfrequenz [Hz]							Einzahlangabe																																						
125	250	500	1k	2k	4k	NRC	α_w																																						
a	0,12	0,54	1,10	0,73	0,49	0,30	0,70	0,50(LM)																																					
b	0,24	0,80	0,97	0,74	0,48	0,31	0,75	0,50(LM)																																					
c	0,39	0,89	0,73	0,55	0,38	0,37	0,65	0,45(LM)																																					
	<p>a 9,5 mm dicke GK-Lochplatte, LA = 15 %, Faservlies und 30 mm MW-Matte, $\rho = 35 \text{ kg/m}^3$, $\Xi = 7,5 \cdot 10^3 \text{ Pa} \cdot \text{s/m}^2$, WA 70 mm, KH = 109,5 mm</p> <p>b wie a, WA 170 mm, KH = 209,5 mm</p> <p>c wie a, WA 370 mm, KH = 409,5 mm</p> <table><tr><th colspan="7">Oktav-Mittenfrequenz [Hz]</th><th colspan="2">Einzahlangabe</th></tr><tr><th>125</th><th>250</th><th>500</th><th>1k</th><th>2k</th><th>4k</th><th>NRC</th><th>α_w</th></tr><tr><td>a</td><td>0,30</td><td>0,69</td><td>1,01</td><td>0,81</td><td>0,66</td><td>0,62</td><td>0,80</td><td>0,70(M)</td></tr><tr><td>b</td><td>0,39</td><td>0,94</td><td>0,92</td><td>0,68</td><td>0,69</td><td>0,58</td><td>0,80</td><td>0,70(L)</td></tr><tr><td>c</td><td>0,75</td><td>0,96</td><td>0,68</td><td>0,79</td><td>0,72</td><td>0,62</td><td>0,80</td><td>0,70(L)</td></tr></table>	Oktav-Mittenfrequenz [Hz]							Einzahlangabe		125	250	500	1k	2k	4k	NRC	α_w	a	0,30	0,69	1,01	0,81	0,66	0,62	0,80	0,70(M)	b	0,39	0,94	0,92	0,68	0,69	0,58	0,80	0,70(L)	c	0,75	0,96	0,68	0,79	0,72	0,62	0,80	0,70(L)
Oktav-Mittenfrequenz [Hz]							Einzahlangabe																																						
125	250	500	1k	2k	4k	NRC	α_w																																						
a	0,30	0,69	1,01	0,81	0,66	0,62	0,80	0,70(M)																																					
b	0,39	0,94	0,92	0,68	0,69	0,58	0,80	0,70(L)																																					
c	0,75	0,96	0,68	0,79	0,72	0,62	0,80	0,70(L)																																					

Tabelle 8.6 (Fortsetzung)

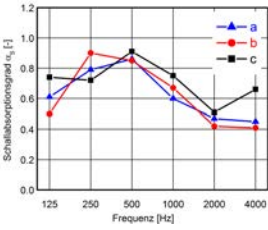
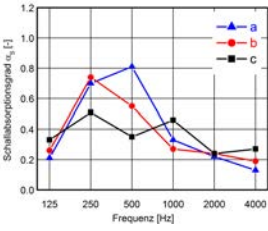
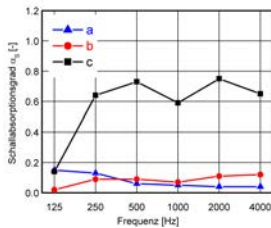
Perforierte Gipskarton-Platten											
Grafik Absorptionsgrad	Beschreibung und Absorptionswerte										
	<p>a 9,5 mm dicke GK-Lochplatte LA = 15 %, 40 mm MW-Matte in 0,05 mm Polyäthylenfolie eingeschlagen, Drahtgeflecht, $\rho = 80 \text{ kg/m}^3$, WA 200 mm, KH = 249,6 mm</p> <p>b wie a, WA 350 mm, KH = 399,6 mm</p> <p>c wie a, WA 550 mm, KH = 599,6 mm</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Oktav-Mittenfrequenz [Hz]</th><th>Einzahlangabe</th></tr> <tr> <th></th><th>125 250 500 1k 2k 4k NRC α_w</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>a</td><td>0,61 0,79 0,86 0,60 0,47 0,45 0,70 0,55(LM)</td></tr> <tr> <td>b</td><td>0,50 0,90 0,85 0,67 0,42 0,41 0,70 0,55(LM)</td></tr> <tr> <td>c</td><td>0,74 0,72 0,91 0,75 0,51 0,66 0,70 0,60(LM)</td></tr> </tbody> </table>	Oktav-Mittenfrequenz [Hz]	Einzahlangabe		125 250 500 1k 2k 4k NRC α_w	a	0,61 0,79 0,86 0,60 0,47 0,45 0,70 0,55(LM)	b	0,50 0,90 0,85 0,67 0,42 0,41 0,70 0,55(LM)	c	0,74 0,72 0,91 0,75 0,51 0,66 0,70 0,60(LM)
Oktav-Mittenfrequenz [Hz]	Einzahlangabe										
	125 250 500 1k 2k 4k NRC α_w										
a	0,61 0,79 0,86 0,60 0,47 0,45 0,70 0,55(LM)										
b	0,50 0,90 0,85 0,67 0,42 0,41 0,70 0,55(LM)										
c	0,74 0,72 0,91 0,75 0,51 0,66 0,70 0,60(LM)										
	<p>a 9,5 mm dicke GK-Lochplatte, LA = 8 %, kachelförmig angeordnet, getrennt durch 30 mm Holzleisten, 40 mm MW-Matte, WA 60 mm, KA = 69,5 mm</p> <p>b wie a, WA 120 mm, KH = 129,5 mm</p> <p>c wie a, WA 240 mm, KH = 249,5 mm</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Oktav-Mittenfrequenz [Hz]</th><th>Einzahlangabe</th></tr> <tr> <th></th><th>125 250 500 1k 2k 4k NRC α_w</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>a</td><td>0,21 0,70 0,81 0,33 0,22 0,13 0,50 0,25(LM)</td></tr> <tr> <td>b</td><td>0,26 0,74 0,55 0,27 0,24 0,19 0,45 0,30(LM)</td></tr> <tr> <td>c</td><td>0,33 0,51 0,35 0,46 0,24 0,27 0,40 0,35(L)</td></tr> </tbody> </table>	Oktav-Mittenfrequenz [Hz]	Einzahlangabe		125 250 500 1k 2k 4k NRC α_w	a	0,21 0,70 0,81 0,33 0,22 0,13 0,50 0,25(LM)	b	0,26 0,74 0,55 0,27 0,24 0,19 0,45 0,30(LM)	c	0,33 0,51 0,35 0,46 0,24 0,27 0,40 0,35(L)
Oktav-Mittenfrequenz [Hz]	Einzahlangabe										
	125 250 500 1k 2k 4k NRC α_w										
a	0,21 0,70 0,81 0,33 0,22 0,13 0,50 0,25(LM)										
b	0,26 0,74 0,55 0,27 0,24 0,19 0,45 0,30(LM)										
c	0,33 0,51 0,35 0,46 0,24 0,27 0,40 0,35(L)										

Tabelle 8.6 (Fortsetzung)



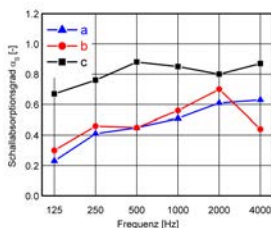
Abbildung 8.6 Akustikputz und weitere Absorberflächen aus gelochtem Gipskarton [Quelle: H. Aleweld, Immobilien Bremen]

Metallverkleidungen**Grafik Absorptionsgrad****Beschreibung und Absorptionswerte**

- a dünne Stahlblechkassetten, unperfor., WA 200 mm
 b wie a, 10 % perforiert, Lochdurchmesser 4 mm, HR leer, WA 200 mm
 c wie b, mit 20 mm GW-Matte hinterlegt

Oktav-Mittenfrequenz [Hz] Einzahlangabe

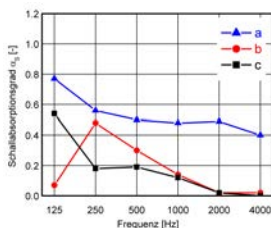
	125	250	500	1k	2k	4k	NRC	α_w
a	0,15	0,13	0,06	0,05	0,04	0,04	0,05	0,05(L)
b	0,02	0,09	0,09	0,07	0,11	0,12	0,10	0,10
c	0,14	0,64	0,73	0,59	0,75	0,65	0,70	0,70



- a 0,5 mm dickes Alulochblech, LA = 23 %, hinterlegt mit Seidenpapier und 10 mm dicken Mineralfaserstreifen, WA 250 mm
 b wie a, ohne Seidenpapier, Mineralfaserstreifen mit Kunststoffolie umhüllt
 c wie b, mit Seidenpapier, Mineralfaserstreifen sowie 20 mm Mineralfaser-Rollfilz, WA 250 mm

Oktav-Mittenfrequenz [Hz] Einzahlangabe

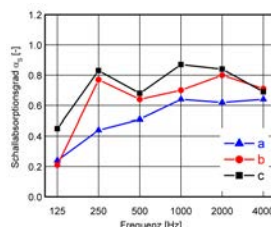
	125	250	500	1k	2k	4k	NRC	α_w
a	0,23	0,41	0,45	0,51	0,61	0,63	0,50	0,50(H)
b	0,30	0,46	0,45	0,56	0,70	0,44	0,55	0,55
c	0,67	0,76	0,88	0,85	0,80	0,87	0,80	0,85



- a 0,5 mm dickes Alulochblech, LA = 12,5 %, WA 450 mm, mit 2 x 19 mm dicke GW-Platte hinterlegt
 b dünnes Aluminiumblech, WA 75 mm, mit 12 mm MW-Filz hinterlegt
 c wie b, WA 300 mm

Oktav-Mittenfrequenz [Hz] Einzahlangabe

	125	250	500	1k	2k	4k	NRC	α_w
a	0,77	0,56	0,50	0,48	0,49	0,40	0,50	0,50(L)
b	0,07	0,48	0,30	0,14	0,02	0,02	0,25	0,10(L)
c	0,54	0,18	0,19	0,12	0,02	0,00	0,15	0,10(L)



- a 0,63 mm dickes rechteckiges, ca. 16 % perforiertes Stahlblech vor 25 mm GW, WA 300 mm
 b Metallkassetten gelocht, hinter mikroporöser Schicht, ohne sichtbare Lochung, vor 300 mm Luft
 c wie b, jedoch mit 20 mm GW

Oktav-Mittenfrequenz [Hz] Einzahlangabe

	125	250	500	1k	2k	4k	NRC	α_w
a	0,24	0,44	0,51	0,64	0,62	0,64	0,55	0,60
b	0,21	0,77	0,64	0,70	0,80	0,71	0,75	0,70(L)
c	0,45	0,83	0,68	0,87	0,84	0,69	0,80	0,80(L)

Tabelle 8.6 (Fortsetzung)

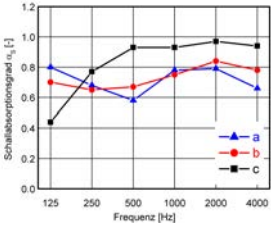
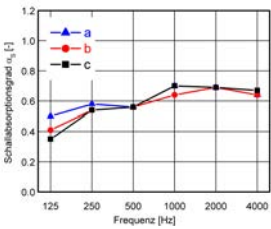
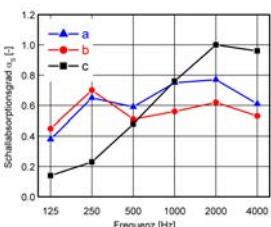
Metallverkleidungen											
Graphik Absorptionsgrad	Beschreibung und Absorptionswerte										
	<p>a dünnes Alublech, LA = 12,6 %, Lochdurchmesser 2 mm, Lochabstand 5 mm, mit Seidenpapier und 25 mm dicker MW hinterlegt, WA 50 mm</p> <p>b wie a, Lochdurchmesser 4 mm, Lochabst. 10 mm</p> <p>c Metallkassetten mit Gewebe vor 10 mm Luft und 2×20 mm dicke bespannte MW-Platte (100 kg/m²), WA 500 mm</p> <table> <tr> <th>Oktav-Mittenfrequenz [Hz]</th><th>Einzahlangabe</th></tr> <tr> <td>125 250 500 1k 2k 4k NRC α_w</td><td></td></tr> <tr> <td>a</td><td>0,80 0,68 0,58 0,78 0,79 0,66 0,70 0,70</td></tr> <tr> <td>b</td><td>0,70 0,65 0,67 0,75 0,84 0,78 0,75 0,75</td></tr> <tr> <td>c</td><td>0,44 0,77 0,93 0,93 0,97 0,94 0,90 0,95</td></tr> </table>	Oktav-Mittenfrequenz [Hz]	Einzahlangabe	125 250 500 1k 2k 4k NRC α_w		a	0,80 0,68 0,58 0,78 0,79 0,66 0,70 0,70	b	0,70 0,65 0,67 0,75 0,84 0,78 0,75 0,75	c	0,44 0,77 0,93 0,93 0,97 0,94 0,90 0,95
Oktav-Mittenfrequenz [Hz]	Einzahlangabe										
125 250 500 1k 2k 4k NRC α_w											
a	0,80 0,68 0,58 0,78 0,79 0,66 0,70 0,70										
b	0,70 0,65 0,67 0,75 0,84 0,78 0,75 0,75										
c	0,44 0,77 0,93 0,93 0,97 0,94 0,90 0,95										
	<p>a 0,63 mm dickes rechteckiges, ca. 16 % perforiertes Stahlblech vor 25 mm GW, Rückseite mit Alufolie kaschiert, WA 300 mm</p> <p>b wie a, ohne Folie</p> <p>c wie b, mit 25 mm GW, auf Alufolie kaschiert, WA 100 mm</p> <table> <tr> <th>Oktav-Mittenfrequenz [Hz]</th><th>Einzahlangabe</th></tr> <tr> <td>125 250 500 1k 2k 4k NRC α_w</td><td></td></tr> <tr> <td>a</td><td>0,50 0,58 0,56 0,70 0,69 0,64 0,65 0,65</td></tr> <tr> <td>b</td><td>0,41 0,54 0,56 0,64 0,69 0,64 0,60 0,65</td></tr> <tr> <td>c</td><td>0,35 0,54 0,56 0,70 0,69 0,67 0,60 0,65</td></tr> </table>	Oktav-Mittenfrequenz [Hz]	Einzahlangabe	125 250 500 1k 2k 4k NRC α_w		a	0,50 0,58 0,56 0,70 0,69 0,64 0,65 0,65	b	0,41 0,54 0,56 0,64 0,69 0,64 0,60 0,65	c	0,35 0,54 0,56 0,70 0,69 0,67 0,60 0,65
Oktav-Mittenfrequenz [Hz]	Einzahlangabe										
125 250 500 1k 2k 4k NRC α_w											
a	0,50 0,58 0,56 0,70 0,69 0,64 0,65 0,65										
b	0,41 0,54 0,56 0,64 0,69 0,64 0,60 0,65										
c	0,35 0,54 0,56 0,70 0,69 0,67 0,60 0,65										
	<p>a gelochte Langfeld-Metallkassetten, LA = 20 %, 3 mm Lochdurchmesser, mit ca. 10 mm dickem Akustikfilz ($\rho = 350 \text{ g/m}^2$) hinterlegt, WA 300 mm</p> <p>b wie a, mit Glasfaservlies (ca. $\rho = 75 \text{ g/m}^2$) hinterlegt, WA 300 mm</p> <p>c 30 mm dicke und 150 mm hohe, senkrecht stehende Lamellen aus beidseitig gelochtem, 1 mm dickem Stahlblech, Lochdurchmesser 2,5 mm, LA = 16 %, mit MW-Platten und GW-Vlies belegt, Lamellenabstand 200 mm, WA 600 mm</p> <table> <tr> <th>Oktav-Mittenfrequenz [Hz]</th><th>Einzahlangabe</th></tr> <tr> <td>125 250 500 1k 2k 4k NRC α_w</td><td></td></tr> <tr> <td>a</td><td>0,38 0,65 0,59 0,75 0,77 0,61 0,70 0,70</td></tr> <tr> <td>b</td><td>0,45 0,70 0,51 0,56 0,62 0,53 0,60 0,55(L)</td></tr> <tr> <td>c</td><td>0,14 0,23 0,48 0,76 1,00 0,96 0,60 0,50(MH)</td></tr> </table>	Oktav-Mittenfrequenz [Hz]	Einzahlangabe	125 250 500 1k 2k 4k NRC α_w		a	0,38 0,65 0,59 0,75 0,77 0,61 0,70 0,70	b	0,45 0,70 0,51 0,56 0,62 0,53 0,60 0,55(L)	c	0,14 0,23 0,48 0,76 1,00 0,96 0,60 0,50(MH)
Oktav-Mittenfrequenz [Hz]	Einzahlangabe										
125 250 500 1k 2k 4k NRC α_w											
a	0,38 0,65 0,59 0,75 0,77 0,61 0,70 0,70										
b	0,45 0,70 0,51 0,56 0,62 0,53 0,60 0,55(L)										
c	0,14 0,23 0,48 0,76 1,00 0,96 0,60 0,50(MH)										

Tabelle 8.6 (Fortsetzung)

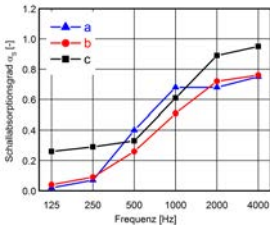
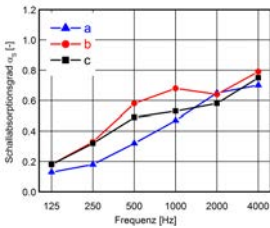
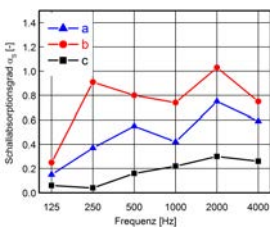
Putz und Ziegelsteine																																												
Grafik Absorptionsgrad	Beschreibung und Absorptionswerte																																											
	<p>a Glasfaserputz, 10 mm b Steinwolleputz, 10 mm c grobkörniger Spritzputz (Blähstoffkörner), 20 mm, auf mit Glattstrich versehener Stegzementdiele</p> <table><tr><th colspan="6">Oktav-Mittenfrequenz [Hz]</th><th colspan="2">Einzahlangabe</th></tr><tr><th>125</th><th>250</th><th>500</th><th>1k</th><th>2k</th><th>4k</th><th>NRC</th><th>α_w</th></tr><tr><td>a</td><td>0,02</td><td>0,07</td><td>0,40</td><td>0,68</td><td>0,68</td><td>0,75</td><td>0,45</td><td>0,35(MH)</td></tr><tr><td>b</td><td>0,04</td><td>0,09</td><td>0,26</td><td>0,51</td><td>0,72</td><td>0,76</td><td>0,40</td><td>0,30(H)</td></tr><tr><td>c</td><td>0,26</td><td>0,29</td><td>0,33</td><td>0,61</td><td>0,89</td><td>0,95</td><td>0,55</td><td>0,45(H)</td></tr></table>	Oktav-Mittenfrequenz [Hz]						Einzahlangabe		125	250	500	1k	2k	4k	NRC	α_w	a	0,02	0,07	0,40	0,68	0,68	0,75	0,45	0,35(MH)	b	0,04	0,09	0,26	0,51	0,72	0,76	0,40	0,30(H)	c	0,26	0,29	0,33	0,61	0,89	0,95	0,55	0,45(H)
Oktav-Mittenfrequenz [Hz]						Einzahlangabe																																						
125	250	500	1k	2k	4k	NRC	α_w																																					
a	0,02	0,07	0,40	0,68	0,68	0,75	0,45	0,35(MH)																																				
b	0,04	0,09	0,26	0,51	0,72	0,76	0,40	0,30(H)																																				
c	0,26	0,29	0,33	0,61	0,89	0,95	0,55	0,45(H)																																				
	<p>a mineralischer Spritzputz aus geblähtem Naturstein auf 12,5 mm dicker GK-Platte, direkt montiert, 12 mm, Spritzstruktur b wie a, 20 mm, Spritzstruktur c wie b, 18 mm, Oberfläche geschliffen</p> <table><tr><th colspan="6">Oktav-Mittenfrequenz [Hz]</th><th colspan="2">Einzahlangabe</th></tr><tr><th>125</th><th>250</th><th>500</th><th>1k</th><th>2k</th><th>4k</th><th>NRC</th><th>α_w</th></tr><tr><td>a</td><td>0,13</td><td>0,18</td><td>0,32</td><td>0,47</td><td>0,65</td><td>0,70</td><td>0,40</td><td>0,40(H)</td></tr><tr><td>b</td><td>0,18</td><td>0,33</td><td>0,58</td><td>0,68</td><td>0,64</td><td>0,79</td><td>0,55</td><td>0,60(H)</td></tr><tr><td>c</td><td>0,18</td><td>0,32</td><td>0,49</td><td>0,53</td><td>0,58</td><td>0,75</td><td>0,50</td><td>0,55(H)</td></tr></table>	Oktav-Mittenfrequenz [Hz]						Einzahlangabe		125	250	500	1k	2k	4k	NRC	α_w	a	0,13	0,18	0,32	0,47	0,65	0,70	0,40	0,40(H)	b	0,18	0,33	0,58	0,68	0,64	0,79	0,55	0,60(H)	c	0,18	0,32	0,49	0,53	0,58	0,75	0,50	0,55(H)
Oktav-Mittenfrequenz [Hz]						Einzahlangabe																																						
125	250	500	1k	2k	4k	NRC	α_w																																					
a	0,13	0,18	0,32	0,47	0,65	0,70	0,40	0,40(H)																																				
b	0,18	0,33	0,58	0,68	0,64	0,79	0,55	0,60(H)																																				
c	0,18	0,32	0,49	0,53	0,58	0,75	0,50	0,55(H)																																				
	<p>a Lochziegelsteine 250 mm x 115 mm x 65 mm, LA = 26 %, HR leer, WA 65 mm b wie a, HR mit MW gefüllt c Lochziegelsteine, 7,10 mm dick, LA = 47 %, HR leer, WA 50 mm</p> <table><tr><th colspan="6">Oktav-Mittenfrequenz [Hz]</th><th colspan="2">Einzahlangabe</th></tr><tr><th>125</th><th>250</th><th>500</th><th>1k</th><th>2k</th><th>4k</th><th>NRC</th><th>α_w</th></tr><tr><td>a</td><td>0,15</td><td>0,37</td><td>0,55</td><td>0,42</td><td>0,75</td><td>0,59</td><td>0,50</td><td>0,50(H)</td></tr><tr><td>b</td><td>0,25</td><td>0,91</td><td>0,80</td><td>0,74</td><td>1,03</td><td>0,75</td><td>0,85</td><td>0,80(L)</td></tr><tr><td>c</td><td>0,06</td><td>0,04</td><td>0,16</td><td>0,22</td><td>0,30</td><td>0,26</td><td>0,20</td><td>0,20</td></tr></table>	Oktav-Mittenfrequenz [Hz]						Einzahlangabe		125	250	500	1k	2k	4k	NRC	α_w	a	0,15	0,37	0,55	0,42	0,75	0,59	0,50	0,50(H)	b	0,25	0,91	0,80	0,74	1,03	0,75	0,85	0,80(L)	c	0,06	0,04	0,16	0,22	0,30	0,26	0,20	0,20
Oktav-Mittenfrequenz [Hz]						Einzahlangabe																																						
125	250	500	1k	2k	4k	NRC	α_w																																					
a	0,15	0,37	0,55	0,42	0,75	0,59	0,50	0,50(H)																																				
b	0,25	0,91	0,80	0,74	1,03	0,75	0,85	0,80(L)																																				
c	0,06	0,04	0,16	0,22	0,30	0,26	0,20	0,20																																				

Tabelle 8.6 (Fortsetzung)

Holzplatten	
Grafik Absorptionsgrad	Beschreibung und Absorptionswerte
	<p>a 4 mm dicke Sperrholzplatte, WA 50 mm b wie a, HR mit MW gefüllt c wie b, LA = 20 %</p> <p>Oktav-Mittenfrequenz [Hz] Einzahlangabe 125 250 500 1k 2k 4k NRC α_w</p> <p>a 0,30 0,20 0,15 0,10 0,08 0,10 0,15 0,15(L) b 0,20 0,40 0,20 0,10 0,08 0,10 0,20 0,15(L) c 0,12 0,45 0,80 0,90 0,78 0,58 0,75 0,70</p>
	<p>a 4 mm dicke Sperrholzplatte, mit 40 mm MW-Matten hinterlegt, kassettiert, 120 mm Abstand zur Wand b 8 mm Sperrholzplatte mit Holzleisten, kassettiert, ohne MW, 60 mm Abstand zur Wand c wie b, mit 40 mm MW hinterlegt</p> <p>Oktav-Mittenfrequenz [Hz] Einzahlangabe 125 250 500 1k 2k 4k NRC α_w</p> <p>a 0,95 0,30 0,14 0,09 0,06 0,03 0,15 0,10(L) b 0,49 0,11 0,10 0,05 0,09 0,11 0,10 0,10 c 0,64 0,16 0,08 0,04 0,09 0,06 0,10 0,10(L)</p>
	<p>a 1,8/1,8/0,5 Verbundplattenperforation, 50 mm HR, 30 mm Dämmwolle b wie a, 4/4/1,5 Perforation c wie a, 6,4/6,4/3,0 Perforation</p> <p>Oktav-Mittenfrequenz [Hz] Einzahlangabe 125 250 500 1k 2k 4k NRC α_w</p> <p>a 0,38 0,64 0,83 0,80 0,69 0,53 0,70 0,75 b 0,29 0,70 1,00 0,96 0,82 0,69 0,85 0,85 c 0,29 0,69 0,99 1,00 0,87 0,78 1,00 0,95(L)</p>
	<p>a 8 mm dicke Spanplatte mit Schlitzung 3 mm Breite, Abstand der Schlitzreihen 700 mm, seitlicher Abstand 25 mm, WA 100 mm b wie a, mit GW hinterlegt c wie b, mit GW und Filz hinterlegt</p> <p>Oktav-Mittenfrequenz [Hz] Einzahlangabe 125 250 500 1k 2k 4k NRC α_w</p> <p>a 0,17 0,43 0,49 0,33 0,23 0,22 0,35 0,30(L) b 0,49 0,78 0,52 0,49 0,28 0,22 0,50 0,35(L) c 0,54 0,90 0,61 0,47 0,31 0,21 0,55 0,35(LM)</p>

Tabelle 8.6 (Fortsetzung)

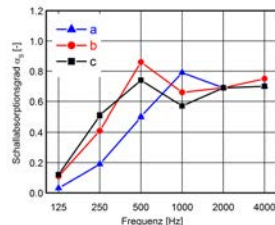
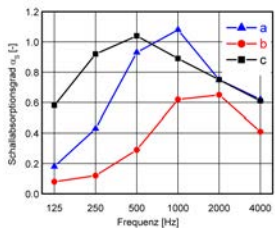
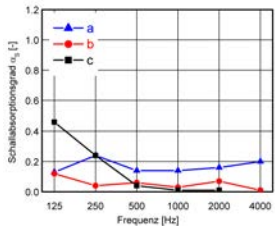
Holzplatten																																								
Grafik Absorptionsgrad	Beschreibung und Absorptionswerte																																							
	<p>a 4 mm dicke Hartfaserlochplatte, LA = 20 %, 20 mm Harnstoff-Formaldehydharz-Schaum mit Nesselstoff umgeben, $\rho = 15 \text{ kg/m}^3$, $\Xi = 50 \times 10^3 \text{ Pas/m}^2$, kein WA</p> <p>b wie a, WA 50 mm</p> <p>c wie b, WA 100 mm</p> <table><tr><th colspan="2">Oktav-Mittenfrequenz [Hz]</th><th colspan="2">Einzahlangabe</th></tr><tr><th>125</th><th>250</th><th>500</th><th>1k</th><th>2k</th><th>4k</th><th>NRC</th><th>α_w</th></tr><tr><td>a</td><td>0,03</td><td>0,19</td><td>0,50</td><td>0,79</td><td>0,69</td><td>0,70</td><td>0,55</td><td>0,50(MH)</td></tr><tr><td>b</td><td>0,11</td><td>0,41</td><td>0,86</td><td>0,66</td><td>0,69</td><td>0,75</td><td>0,65</td><td>0,65</td></tr><tr><td>c</td><td>0,12</td><td>0,51</td><td>0,74</td><td>0,57</td><td>0,69</td><td>0,70</td><td>0,65</td><td>0,65</td></tr></table>	Oktav-Mittenfrequenz [Hz]		Einzahlangabe		125	250	500	1k	2k	4k	NRC	α_w	a	0,03	0,19	0,50	0,79	0,69	0,70	0,55	0,50(MH)	b	0,11	0,41	0,86	0,66	0,69	0,75	0,65	0,65	c	0,12	0,51	0,74	0,57	0,69	0,70	0,65	0,65
Oktav-Mittenfrequenz [Hz]		Einzahlangabe																																						
125	250	500	1k	2k	4k	NRC	α_w																																	
a	0,03	0,19	0,50	0,79	0,69	0,70	0,55	0,50(MH)																																
b	0,11	0,41	0,86	0,66	0,69	0,75	0,65	0,65																																
c	0,12	0,51	0,74	0,57	0,69	0,70	0,65	0,65																																
	<p>a 16 mm dicke MDF-Platte, frontseitig furniert und gelocht, Lochdurchmesser 8 mm, Lochabstand 16 mm, LA = 19 %, mit Akustikvlies, WA 30 mm, HR mit 30 mm MW bedämpft</p> <p>b wie a, nur mit Akustikvlies, ohne MW</p> <p>c wie b, WA 200 mm, HR mit 30 mm MW-Platten bedämpft</p> <table><tr><th colspan="2">Oktav-Mittenfrequenz [Hz]</th><th colspan="2">Einzahlangabe</th></tr><tr><th>125</th><th>250</th><th>500</th><th>1k</th><th>2k</th><th>4k</th><th>NRC</th><th>α_w</th></tr><tr><td>a</td><td>0,18</td><td>0,43</td><td>0,93</td><td>1,08</td><td>0,75</td><td>0,62</td><td>0,80</td><td>0,70(M)</td></tr><tr><td>b</td><td>0,08</td><td>0,12</td><td>0,29</td><td>0,62</td><td>0,65</td><td>0,41</td><td>0,40</td><td>0,35(MH)</td></tr><tr><td>c</td><td>0,58</td><td>0,92</td><td>1,04</td><td>0,89</td><td>0,75</td><td>0,61</td><td>0,90</td><td>0,75(LM)</td></tr></table>	Oktav-Mittenfrequenz [Hz]		Einzahlangabe		125	250	500	1k	2k	4k	NRC	α_w	a	0,18	0,43	0,93	1,08	0,75	0,62	0,80	0,70(M)	b	0,08	0,12	0,29	0,62	0,65	0,41	0,40	0,35(MH)	c	0,58	0,92	1,04	0,89	0,75	0,61	0,90	0,75(LM)
Oktav-Mittenfrequenz [Hz]		Einzahlangabe																																						
125	250	500	1k	2k	4k	NRC	α_w																																	
a	0,18	0,43	0,93	1,08	0,75	0,62	0,80	0,70(M)																																
b	0,08	0,12	0,29	0,62	0,65	0,41	0,40	0,35(MH)																																
c	0,58	0,92	1,04	0,89	0,75	0,61	0,90	0,75(LM)																																
	<p>a schwere Holzplatte ($\rho = 620 \text{ kg/m}^3$) 10 mm dick, grobe Oberfläche, WA 20 mm</p> <p>b wie a, 22 mm dick, mit 30 mm MW-Matte hinterlegt, WA 50 mm</p> <p>c wie b, 8 mm dick, mit 20 mm MW-Matte hinterlegt, WA 20 mm</p> <table><tr><th colspan="2">Oktav-Mittenfrequenz [Hz]</th><th colspan="2">Einzahlangabe</th></tr><tr><th>125</th><th>250</th><th>500</th><th>1k</th><th>2k</th><th>4k</th><th>NRC</th><th>α_w</th></tr><tr><td>a</td><td>0,13</td><td>0,24</td><td>0,14</td><td>0,14</td><td>0,16</td><td>0,20</td><td>0,15</td><td>0,15(L)</td></tr><tr><td>b</td><td>0,12</td><td>0,04</td><td>0,06</td><td>0,03</td><td>0,07</td><td>0,01</td><td>0,05</td><td>0,05</td></tr><tr><td>c</td><td>0,46</td><td>0,24</td><td>0,04</td><td>0,01</td><td>0,01</td><td>-</td><td>0,10</td><td>0,05(L)</td></tr></table>	Oktav-Mittenfrequenz [Hz]		Einzahlangabe		125	250	500	1k	2k	4k	NRC	α_w	a	0,13	0,24	0,14	0,14	0,16	0,20	0,15	0,15(L)	b	0,12	0,04	0,06	0,03	0,07	0,01	0,05	0,05	c	0,46	0,24	0,04	0,01	0,01	-	0,10	0,05(L)
Oktav-Mittenfrequenz [Hz]		Einzahlangabe																																						
125	250	500	1k	2k	4k	NRC	α_w																																	
a	0,13	0,24	0,14	0,14	0,16	0,20	0,15	0,15(L)																																
b	0,12	0,04	0,06	0,03	0,07	0,01	0,05	0,05																																
c	0,46	0,24	0,04	0,01	0,01	-	0,10	0,05(L)																																

Tabelle 8.6 (Fortsetzung)

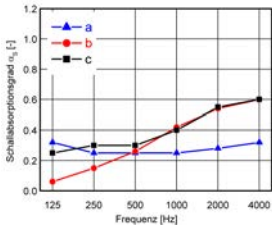
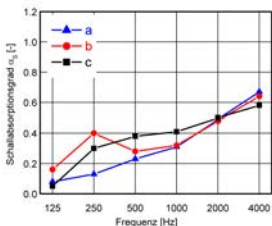
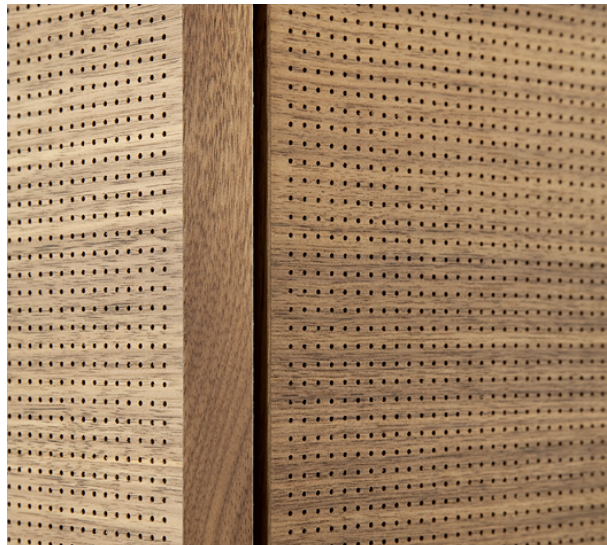
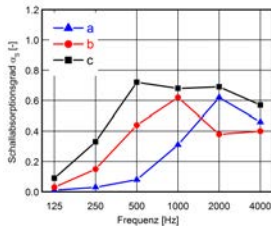
Holzplatten																																								
Graphik Absorptionsgrad	Beschreibung und Absorptionswerte																																							
	<p>a Holzfaser-Isolierbauplatte ($\rho = 200 \text{ kg/m}^3$), 13 mm dicke Schlichtplatte, WA 50 mm</p> <p>b wie a, 12,5 mm dick, gelocht, direkt auf Wand</p> <p>c wie b, WA 50 mm</p> <table><tr><th colspan="2">Oktav-Mittenfrequenz [Hz]</th><th colspan="2">Einzahlangabe</th></tr><tr><th>125</th><th>250</th><th>500</th><th>1k</th><th>2k</th><th>4k</th><th>NRC</th><th>α_w</th></tr><tr><td>a</td><td>0,32</td><td>0,25</td><td>0,25</td><td>0,25</td><td>0,28</td><td>0,32</td><td>0,25</td><td>0,30</td></tr><tr><td>b</td><td>0,06</td><td>0,15</td><td>0,26</td><td>0,42</td><td>0,54</td><td>0,60</td><td>0,35</td><td>0,35(H)</td></tr><tr><td>c</td><td>0,25</td><td>0,30</td><td>0,30</td><td>0,40</td><td>0,55</td><td>0,60</td><td>0,40</td><td>0,40(H)</td></tr></table>	Oktav-Mittenfrequenz [Hz]		Einzahlangabe		125	250	500	1k	2k	4k	NRC	α_w	a	0,32	0,25	0,25	0,25	0,28	0,32	0,25	0,30	b	0,06	0,15	0,26	0,42	0,54	0,60	0,35	0,35(H)	c	0,25	0,30	0,30	0,40	0,55	0,60	0,40	0,40(H)
Oktav-Mittenfrequenz [Hz]		Einzahlangabe																																						
125	250	500	1k	2k	4k	NRC	α_w																																	
a	0,32	0,25	0,25	0,25	0,28	0,32	0,25	0,30																																
b	0,06	0,15	0,26	0,42	0,54	0,60	0,35	0,35(H)																																
c	0,25	0,30	0,30	0,40	0,55	0,60	0,40	0,40(H)																																
	<p>a Holzfaser-Isolierbauplatte ($\rho = 200 \text{ kg/m}^3$), 12 mm dick, kreuzgerillt, direkt auf Wand</p> <p>b wie a, WA 50 mm</p> <p>c Holzfaser-Isolierbauplatte ($\rho = 200 \text{ kg/m}^3$) 12 mm dick mit Hartdeck, Abstand 30 mm auf Holzlatzen</p> <table><tr><th colspan="2">Oktav-Mittenfrequenz [Hz]</th><th colspan="2">Einzahlangabe</th></tr><tr><th>125</th><th>250</th><th>500</th><th>1k</th><th>2k</th><th>4k</th><th>NRC</th><th>α_w</th></tr><tr><td>a</td><td>0,08</td><td>0,13</td><td>0,23</td><td>0,31</td><td>0,49</td><td>0,67</td><td>0,30</td><td>0,30(H)</td></tr><tr><td>b</td><td>0,16</td><td>0,40</td><td>0,28</td><td>0,32</td><td>0,48</td><td>0,64</td><td>0,35</td><td>0,35(LH)</td></tr><tr><td>c</td><td>0,05</td><td>0,30</td><td>0,38</td><td>0,41</td><td>0,50</td><td>0,58</td><td>0,40</td><td>0,45(H)</td></tr></table>	Oktav-Mittenfrequenz [Hz]		Einzahlangabe		125	250	500	1k	2k	4k	NRC	α_w	a	0,08	0,13	0,23	0,31	0,49	0,67	0,30	0,30(H)	b	0,16	0,40	0,28	0,32	0,48	0,64	0,35	0,35(LH)	c	0,05	0,30	0,38	0,41	0,50	0,58	0,40	0,45(H)
Oktav-Mittenfrequenz [Hz]		Einzahlangabe																																						
125	250	500	1k	2k	4k	NRC	α_w																																	
a	0,08	0,13	0,23	0,31	0,49	0,67	0,30	0,30(H)																																
b	0,16	0,40	0,28	0,32	0,48	0,64	0,35	0,35(LH)																																
c	0,05	0,30	0,38	0,41	0,50	0,58	0,40	0,45(H)																																

Tabelle 8.6 (Fortsetzung)

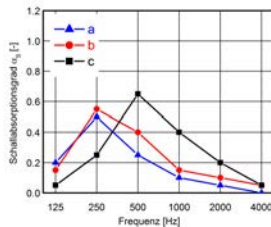
Abbildung 8.7 Nahaufnahme kleinperforiertes Holz
[Quelle: Strähle Raum-Systeme GmbH]



Durchsichtige Kunststoffe**Grafik Absorptionsgrad****Beschreibung und Absorptionswerte**

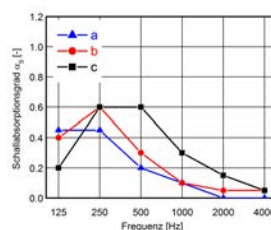
- a 105 μm dicke, transparente Polycarbonatfolie mit Mikroperforation, Lochdurchmesser 0,21 mm, Lochabstand 2,0 mm, 140 g/m²: einlagig vor 30 mm HR
- b wie a, 100 mm HR
- c wie b, zweilagig vor 100 mm HR, Abstand zwischen den Folien 30 mm

Oktav-Mittenfrequenz [Hz]	Einzahlangabe						
	125	250	500	1k	2k	4k	NRC α_w
a	0,01	0,03	0,08	0,31	0,62	0,46	0,25 0,20(H)
b	0,03	0,15	0,44	0,62	0,38	0,40	0,40 0,40
c	0,09	0,33	0,72	0,68	0,69	0,57	0,60 0,65



- a Kunstglasplatte, Plattendicke 10 mm, Lochabstand 8 mm, Lochdurchmesser 0,80 mm, LA = 0,79 %, Luftschicht 50 mm
- b wie a, Plattendicke 15 mm, Lochabstand 6 mm, Lochdurchmesser 0,95 mm, LA = 1,97 %, Luftschicht 50 mm
- c wie a, Plattendicke 5 mm, Lochabstand 5 mm, Lochdurchmesser 0,80 mm, LA = 2,01 %, Luftschicht 50 mm

Oktav-Mittenfrequenz [Hz]	Einzahlangabe						
	125	250	500	1k	2k	4k	NRC α_w
a	0,20	0,50	0,25	0,10	0,05	0,00	0,25 0,10(L)
b	0,15	0,55	0,40	0,15	0,10	0,05	0,30 0,15(LM)
c	0,05	0,25	0,65	0,40	0,20	0,05	0,40 0,20(LM)



- a Kunstglasplatte, Plattendicke 10 mm, Lochabstand 8 mm, Lochdurchmesser 0,80 mm, LA = 0,79 %, Luftschicht 100 mm
- b wie a, Plattendicke 15 mm, Lochabstand 6 mm, Lochdurchmesser 0,95 mm, LA = 1,97 %, Luftschicht 100 mm
- c wie a, Plattendicke 5 mm, Lochabstand 5 mm, Lochdurchmesser 0,80 mm, LA = 2,01 %, Luftschicht 100 mm

Oktav-Mittenfrequenz [Hz]	Einzahlangabe						
	125	250	500	1k	2k	4k	NRC α_w
a	0,45	0,45	0,20	0,10	0,00	0,00	0,20 0,10(L)
b	0,40	0,60	0,30	0,10	0,05	0,05	0,25 0,10(L)
c	0,20	0,60	0,60	0,30	0,15	0,05	0,40 0,20(LM)

Tabelle 8.6 (Fortsetzung)

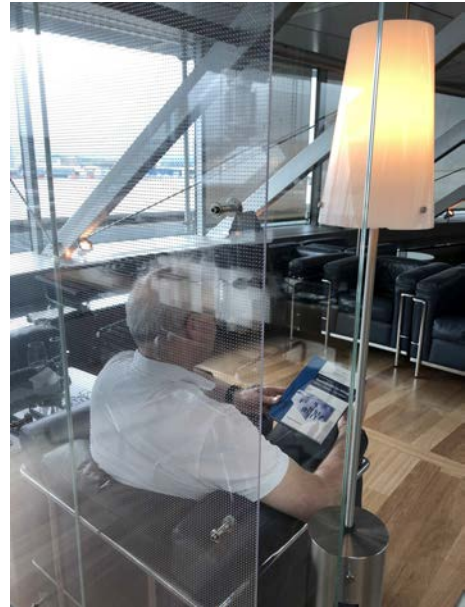


Abbildung 8.8 Mikroperforierte Acrylglas-Elemente in der Lounge am Flughafen Mulhouse / Basel / Freiburg (mit Autor)

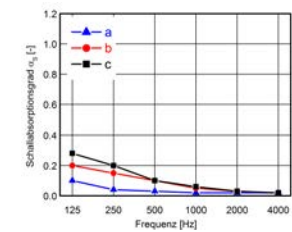
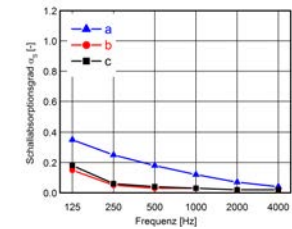
Verglasungen / Fenster																																					
Grafik Absorptionsgrad	Beschreibung und Absorptionswerte																																				
	<p>a geschlossenes Doppelfenster b Isolierglasscheibe 4/12/4 c Kastenfenster</p> <p>Oktav-Mittenfrequenz [Hz] Einzahlangabe</p> <table><tr><th></th><th>125</th><th>250</th><th>500</th><th>1k</th><th>2k</th><th>4k</th><th>NRC</th><th>α_w</th></tr><tr><td>a</td><td>0,10</td><td>0,04</td><td>0,03</td><td>0,02</td><td>0,02</td><td>0,02</td><td>0,05</td><td>0,05</td></tr><tr><td>b</td><td>0,20</td><td>0,15</td><td>0,10</td><td>0,05</td><td>0,03</td><td>0,02</td><td>0,10</td><td>0,10(L)</td></tr><tr><td>c</td><td>0,28</td><td>0,20</td><td>0,10</td><td>0,06</td><td>0,03</td><td>0,02</td><td>0,10</td><td>0,10(L)</td></tr></table>		125	250	500	1k	2k	4k	NRC	α_w	a	0,10	0,04	0,03	0,02	0,02	0,02	0,05	0,05	b	0,20	0,15	0,10	0,05	0,03	0,02	0,10	0,10(L)	c	0,28	0,20	0,10	0,06	0,03	0,02	0,10	0,10(L)
	125	250	500	1k	2k	4k	NRC	α_w																													
a	0,10	0,04	0,03	0,02	0,02	0,02	0,05	0,05																													
b	0,20	0,15	0,10	0,05	0,03	0,02	0,10	0,10(L)																													
c	0,28	0,20	0,10	0,06	0,03	0,02	0,10	0,10(L)																													
	<p>a gewöhnliches Fensterglas b Doppelverglasung, 2–3 mm Glas, > 30 mm Spaltbreite c Glas mit hoher Dicke, große Scheiben</p> <p>Oktav-Mittenfrequenz [Hz] Einzahlangabe</p> <table><tr><th></th><th>125</th><th>250</th><th>500</th><th>1k</th><th>2k</th><th>4k</th><th>NRC</th><th>α_w</th></tr><tr><td>a</td><td>0,35</td><td>0,25</td><td>0,18</td><td>0,12</td><td>0,07</td><td>0,04</td><td>0,15</td><td>0,10(L)</td></tr><tr><td>b</td><td>0,15</td><td>0,05</td><td>0,03</td><td>0,03</td><td>0,02</td><td>0,02</td><td>0,05</td><td>0,05</td></tr><tr><td>c</td><td>0,18</td><td>0,06</td><td>0,04</td><td>0,03</td><td>0,02</td><td>0,02</td><td>0,05</td><td>0,05</td></tr></table>		125	250	500	1k	2k	4k	NRC	α_w	a	0,35	0,25	0,18	0,12	0,07	0,04	0,15	0,10(L)	b	0,15	0,05	0,03	0,03	0,02	0,02	0,05	0,05	c	0,18	0,06	0,04	0,03	0,02	0,02	0,05	0,05
	125	250	500	1k	2k	4k	NRC	α_w																													
a	0,35	0,25	0,18	0,12	0,07	0,04	0,15	0,10(L)																													
b	0,15	0,05	0,03	0,03	0,02	0,02	0,05	0,05																													
c	0,18	0,06	0,04	0,03	0,02	0,02	0,05	0,05																													

Tabelle 8.6 (Fortsetzung)

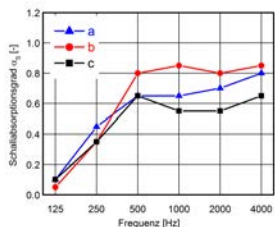
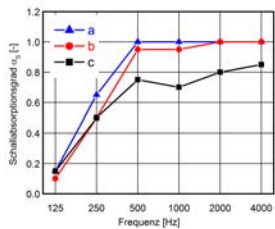
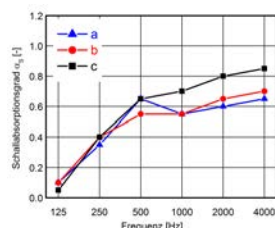
Vorhänge																																														
Grafik Absorptionsgrad	Beschreibung und Absorptionswerte																																													
	<p>a schwerer Velours, Leinen-Baumwolle-Gemisch, 614 g/m², $\Xi = 2\,510\text{ Pa s/m}^2$, mittlerer WA, glatt</p> <p>b schwerer Wollstoff mit 20 % Polyamidanteil, 350 g/m², $\Xi = 963\text{ Pa s/m}^2$, mittlerer WA 150 mm, glatt</p> <p>c Strukturiertes schweres Polyestergewebe, 352 g/m², $\Xi = 202\text{ Pa s/m}^2$, mittlerer WA 150 mm, glatt</p> <table><tr><th colspan="7">Oktav-Mittenfrequenz [Hz]</th><th colspan="2">Einzahlangabe</th></tr><tr><th>125</th><th>250</th><th>500</th><th>1k</th><th>2k</th><th>4k</th><th>NRC</th><th>α_w</th><th></th></tr><tr><td>a</td><td>0,10</td><td>0,45</td><td>0,65</td><td>0,65</td><td>0,70</td><td>0,80</td><td>0,60</td><td>0,65(H)</td></tr><tr><td>b</td><td>0,05</td><td>0,35</td><td>0,80</td><td>0,85</td><td>0,80</td><td>0,85</td><td>0,70</td><td>0,65(H)</td></tr><tr><td>c</td><td>0,10</td><td>0,35</td><td>0,65</td><td>0,55</td><td>0,55</td><td>0,65</td><td>0,55</td><td>0,55</td></tr></table>	Oktav-Mittenfrequenz [Hz]							Einzahlangabe		125	250	500	1k	2k	4k	NRC	α_w		a	0,10	0,45	0,65	0,65	0,70	0,80	0,60	0,65(H)	b	0,05	0,35	0,80	0,85	0,80	0,85	0,70	0,65(H)	c	0,10	0,35	0,65	0,55	0,55	0,65	0,55	0,55
Oktav-Mittenfrequenz [Hz]							Einzahlangabe																																							
125	250	500	1k	2k	4k	NRC	α_w																																							
a	0,10	0,45	0,65	0,65	0,70	0,80	0,60	0,65(H)																																						
b	0,05	0,35	0,80	0,85	0,80	0,85	0,70	0,65(H)																																						
c	0,10	0,35	0,65	0,55	0,55	0,65	0,55	0,55																																						
	<p>a schwerer Velours, Leinen-Baumwolle-Gemisch, 614 g/m², $\Xi = 2\,510\text{ Pa s/m}^2$, mittlerer WA, gefaltet, 100 % Faltenzugabe</p> <p>b schwerer Wollstoff mit 20 % Polyamidanteil, 350 g/m², $\Xi = 963\text{ Pa s/m}^2$, mittlerer WA 150 mm, gefaltet, 100 % Faltenzugabe</p> <p>c Strukturiertes schweres Polyestergewebe, 352 g/m², $\Xi = 202\text{ Pa s/m}^2$, mittlerer WA 150 mm, gefaltet, 100 % Faltenzugabe</p> <table><tr><th colspan="7">Oktav-Mittenfrequenz [Hz]</th><th colspan="2">Einzahlangabe</th></tr><tr><th>125</th><th>250</th><th>500</th><th>1k</th><th>2k</th><th>4k</th><th>NRC</th><th>α_w</th><th></th></tr><tr><td>a</td><td>0,15</td><td>0,65</td><td>1,00</td><td>1,00</td><td>1,00</td><td>1,00</td><td>0,90</td><td>0,95</td></tr><tr><td>b</td><td>0,10</td><td>0,50</td><td>0,95</td><td>0,95</td><td>1,00</td><td>1,00</td><td>0,85</td><td>0,80(H)</td></tr><tr><td>c</td><td>0,15</td><td>0,50</td><td>0,75</td><td>0,70</td><td>0,80</td><td>0,85</td><td>0,70</td><td>0,75</td></tr></table>	Oktav-Mittenfrequenz [Hz]							Einzahlangabe		125	250	500	1k	2k	4k	NRC	α_w		a	0,15	0,65	1,00	1,00	1,00	1,00	0,90	0,95	b	0,10	0,50	0,95	0,95	1,00	1,00	0,85	0,80(H)	c	0,15	0,50	0,75	0,70	0,80	0,85	0,70	0,75
Oktav-Mittenfrequenz [Hz]							Einzahlangabe																																							
125	250	500	1k	2k	4k	NRC	α_w																																							
a	0,15	0,65	1,00	1,00	1,00	1,00	0,90	0,95																																						
b	0,10	0,50	0,95	0,95	1,00	1,00	0,85	0,80(H)																																						
c	0,15	0,50	0,75	0,70	0,80	0,85	0,70	0,75																																						
	<p>a leicht strukturiertes, schweres Polyestergewebe, 336 g/m², $\Xi = 243\text{ Pa s/m}^2$, mittlerer WA 150 mm, glatt</p> <p>b Polyestergewebe, Ripsoptik, 424 g/m², $\Xi = 210\text{ Pa s/m}^2$, mittlerer WA 150 mm, glatt</p> <p>c Wollstoff mit 13 % Polyamidanteil, 386 g/m², $\Xi = 907\text{ Pa s/m}^2$, mittlerer WA 150 mm, glatt</p> <table><tr><th colspan="7">Oktav-Mittenfrequenz [Hz]</th><th colspan="2">Einzahlangabe</th></tr><tr><th>125</th><th>250</th><th>500</th><th>1k</th><th>2k</th><th>4k</th><th>NRC</th><th>α_w</th><th></th></tr><tr><td>a</td><td>0,10</td><td>0,35</td><td>0,65</td><td>0,55</td><td>0,60</td><td>0,65</td><td>0,55</td><td>0,60</td></tr><tr><td>b</td><td>0,10</td><td>0,40</td><td>0,55</td><td>0,55</td><td>0,65</td><td>0,70</td><td>0,55</td><td>0,60</td></tr><tr><td>c</td><td>0,05</td><td>0,40</td><td>0,65</td><td>0,70</td><td>0,80</td><td>0,85</td><td>0,65</td><td>0,65(H)</td></tr></table>	Oktav-Mittenfrequenz [Hz]							Einzahlangabe		125	250	500	1k	2k	4k	NRC	α_w		a	0,10	0,35	0,65	0,55	0,60	0,65	0,55	0,60	b	0,10	0,40	0,55	0,55	0,65	0,70	0,55	0,60	c	0,05	0,40	0,65	0,70	0,80	0,85	0,65	0,65(H)
Oktav-Mittenfrequenz [Hz]							Einzahlangabe																																							
125	250	500	1k	2k	4k	NRC	α_w																																							
a	0,10	0,35	0,65	0,55	0,60	0,65	0,55	0,60																																						
b	0,10	0,40	0,55	0,55	0,65	0,70	0,55	0,60																																						
c	0,05	0,40	0,65	0,70	0,80	0,85	0,65	0,65(H)																																						

Tabelle 8.7 Schallabsorptionsgrad für Vorhänge, Baffles und weitere Materialien

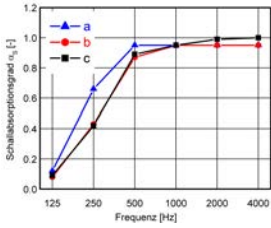
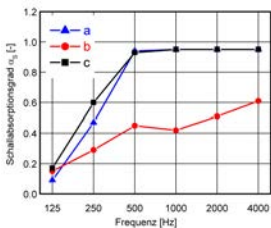
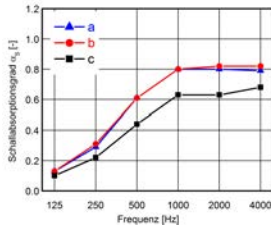
Vorhänge											
Grafik Absorptionsgrad	Beschreibung und Absorptionswerte										
	<p>a Akustikvorhang 614 g/m², gefaltet, 100 % Faltenzugabe</p> <p>b wie a, 395 g/m²</p> <p>c Akustikvorhang vom Typ hochabsorbierend, WA 15 mm, gefaltet, 100 % Faltenzugabe</p> <table> <tr> <th>Oktav-Mittenfrequenz [Hz]</th><th>Einzahlangabe</th></tr> <tr> <td>125 250 500 1k 2k 4k</td><td>NRC α_w</td></tr> <tr> <td>a</td><td>0,12 0,66 0,95 0,95 0,95 0,95 0,90 0,95</td></tr> <tr> <td>b</td><td>0,08 0,43 0,87 0,95 0,95 0,95 0,80 0,75(H)</td></tr> <tr> <td>c</td><td>0,09 0,42 0,89 0,95 0,99 1,00 0,80 0,70(MH)</td></tr> </table>	Oktav-Mittenfrequenz [Hz]	Einzahlangabe	125 250 500 1k 2k 4k	NRC α_w	a	0,12 0,66 0,95 0,95 0,95 0,95 0,90 0,95	b	0,08 0,43 0,87 0,95 0,95 0,95 0,80 0,75(H)	c	0,09 0,42 0,89 0,95 0,99 1,00 0,80 0,70(MH)
Oktav-Mittenfrequenz [Hz]	Einzahlangabe										
125 250 500 1k 2k 4k	NRC α_w										
a	0,12 0,66 0,95 0,95 0,95 0,95 0,90 0,95										
b	0,08 0,43 0,87 0,95 0,95 0,95 0,80 0,75(H)										
c	0,09 0,42 0,89 0,95 0,99 1,00 0,80 0,70(MH)										
	<p>a Akustikvorhang, gefaltet, 343 g/m², Faltenzugabe 82%</p> <p>b Akustikvorhang vom Typ mittelabsorbierend, gefaltet, 475 g/m², Faltenzugabe 82%</p> <p>c Akustikvorhang, gefaltet, 409 g/m², 100% Faltenzugabe</p> <table> <tr> <th>Oktav-Mittenfrequenz [Hz]</th><th>Einzahlangabe</th></tr> <tr> <td>125 250 500 1k 2k 4k</td><td>NRC α_w</td></tr> <tr> <td>a</td><td>0,09 0,47 0,94 0,95 0,95 0,95 0,85 0,75(H)</td></tr> <tr> <td>b</td><td>0,15 0,29 0,45 0,42 0,51 0,61 0,40 0,45(H)</td></tr> <tr> <td>c</td><td>0,17 0,60 0,93 0,95 0,95 0,95 0,85 0,90</td></tr> </table>	Oktav-Mittenfrequenz [Hz]	Einzahlangabe	125 250 500 1k 2k 4k	NRC α_w	a	0,09 0,47 0,94 0,95 0,95 0,95 0,85 0,75(H)	b	0,15 0,29 0,45 0,42 0,51 0,61 0,40 0,45(H)	c	0,17 0,60 0,93 0,95 0,95 0,95 0,85 0,90
Oktav-Mittenfrequenz [Hz]	Einzahlangabe										
125 250 500 1k 2k 4k	NRC α_w										
a	0,09 0,47 0,94 0,95 0,95 0,95 0,85 0,75(H)										
b	0,15 0,29 0,45 0,42 0,51 0,61 0,40 0,45(H)										
c	0,17 0,60 0,93 0,95 0,95 0,95 0,85 0,90										

Tabelle 8.7 (Fortsetzung)

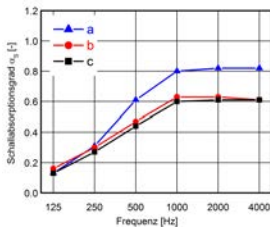
Abbildung 8.9 Akustisch wirksame Vorhänge
[Quelle: Creation Baumann]



Baffle-Absorber**Grafik Absorptionsgrad****Beschreibung und Absorptionswerte**

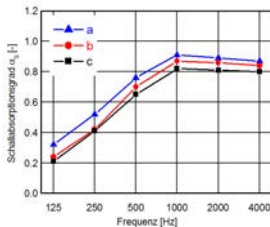
- a Melaminharz-Schaumstoffbaffle, Maße (HxBxT): 1200x625x50 mm, Abstand der Einzelelemente in Reihenrichtung 40 mm, 200 mm abgehängt, Achsabstand 625 mm
 b wie a, Oberfläche farbbeschichtet
 c wie b, Achsabstand 935 mm

	Oktav-Mittenfrequenz [Hz]						Einzahlangabe	
	125	250	500	1k	2k	4k	NRC	α_w
a	0,13	0,29	0,61	0,80	0,80	0,79	0,65	0,60(H)
b	0,13	0,31	0,61	0,80	0,82	0,82	0,65	0,60(H)
c	0,10	0,22	0,44	0,63	0,63	0,68	0,50	0,45(H)



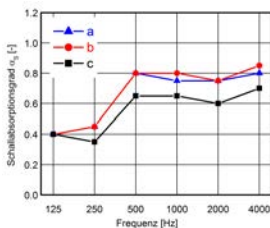
- a Baffle aus Melaminharz, Achsabstand 625 mm, Form Rechteck
 b wie a, Form Rund
 c wie a, Form Ellipse

	Oktav-Mittenfrequenz [Hz]						Einzahlangabe	
	125	250	500	1k	2k	4k	NRC	α_w
a	0,13	0,31	0,61	0,80	0,82	0,82	0,65	0,60(H)
b	0,16	0,30	0,47	0,63	0,63	0,61	0,50	0,50
c	0,13	0,27	0,44	0,60	0,61	0,61	0,50	0,50



- a Baffle aus Steinwolle, Höhe 450 mm, Achsabstand 350 mm
 b wie a, Achsabstand 450 mm
 c wie a, Achsabstand 600 mm

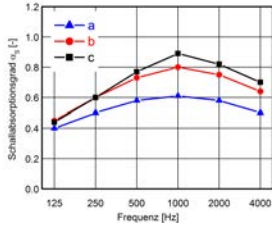
	Oktav-Mittenfrequenz [Hz]						Einzahlangabe	
	125	250	500	1k	2k	4k	NRC	α_w
a	0,32	0,52	0,76	0,91	0,89	0,87	0,75	0,75
b	0,24	0,42	0,70	0,87	0,86	0,84	0,70	0,70(H)
c	0,21	0,41	0,65	0,82	0,81	0,80	0,65	0,65(H)



- a magnesitgebundener Holzwoollbaffle, 1200x600 mm, Plattendicke 55 mm, Reihenabstand 350 mm, Abhängenhöhe 0 mm
 b wie a, 1200x600mm, Abhängenhöhe 300 mm
 c wie a, Reihenabstand 700 mm

	Oktav-Mittenfrequenz [Hz]						Einzahlangabe	
	125	250	500	1k	2k	4k	NRC	α_w
a	0,40	0,45	0,80	0,75	0,75	0,80	0,70	0,75
b	0,40	0,45	0,80	0,80	0,75	0,85	0,70	0,75
c	0,40	0,35	0,65	0,65	0,60	0,70	0,55	0,60

Tabelle 8.7 (Fortsetzung)

Theaterbestuhlung, flächenhaft**Graphik Absorptionsgrad****Beschreibung und Absorptionswerte**

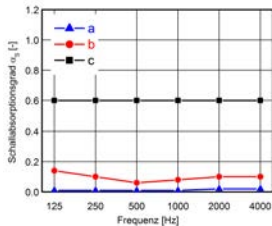
- a mit Leder gepolsterte Sitzflächen
 b gepolsterte Sitzflächen
 c stark gepolsterte Sitzflächen

Oktav-Mittenfrequenz [Hz]

Einzahlangabe

	125	250	500	1k	2k	4k	NRC	α_w
a	0,40	0,50	0,58	0,61	0,58	0,50	0,55	0,60
b	0,45	0,60	0,73	0,80	0,75	0,64	0,70	0,75
c	0,44	0,60	0,77	0,89	0,82	0,70	0,75	0,80

Tabelle 8.7 (Fortsetzung)

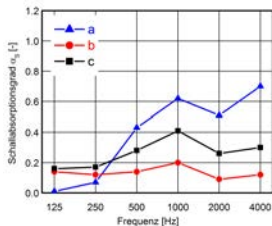
Weitere Angaben**Graphik Absorptionsgrad****Beschreibung und Absorptionswerte**

- a Wasseroberfläche in Schwimmabad
 b massive Holztür
 c Lüftungsgitter

Oktav-Mittenfrequenz [Hz]

Einzahlangabe

	125	250	500	1k	2k	4k	NRC	α_w
a	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,00	0,00
b	0,14	0,10	0,06	0,08	0,10	0,10	0,10	0,10
c	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60



- a Eierkartons, flächig ausgelegt
 b Diffusor, 2D N=7 QRDTM, Design Freq. = 500 Hz
 c wie b, mit Stoff bespannt

Oktav-Mittenfrequenz [Hz]

Einzahlangabe

	125	250	500	1k	2k	4k	NRC	α_w
a	0,01	0,07	0,43	0,62	0,51	0,70	0,40	0,35(MH)
b	0,14	0,12	0,14	0,20	0,09	0,12	0,15	0,15
c	0,16	0,17	0,28	0,41	0,26	0,30	0,30	0,30

Tabelle 8.7 (Fortsetzung)

Schränke	
Grafik Absorptionsfläche	Beschreibung und Absorptionswerte
	<p>a Schrank, schallabsorbierender Rolladen, 1200 mm breit, 5 OH</p> <p>b Schrank, glatte Jalousie, 1200 mm breit, 5 OH</p> <p>c Schrank, gelochte Schiebetür, Rückwand Holz, gelocht, vor 7 mm Luft, 1200 mm breit, 5 OH</p> <p>Oktav-Mittenfrequenz [Hz]</p> <p>125 250 500 1k 2k 4k</p> <p>a 1,63 1,84 1,31 1,63 1,54 1,56</p> <p>b 0,83 0,76 0,52 0,48 0,41 0,45</p> <p>c 2,60 2,18 2,01 3,11 3,40 1,99</p>
	<p>a Schrank, gelochte Schiebetür, Rückwand Holz, gelocht, vor 7 mm Luft, 1200 mm breit, 5 OH</p> <p>b Schrank, glatte Schiebetür, Rückwand glatt, 1200 mm breit, 5 OH</p> <p>c Hochschrank, Drehtür gelocht, Absorber-Rückwand, 1200 mm breit, 5 OH</p> <p>Oktav-Mittenfrequenz [Hz]</p> <p>125 250 500 1k 2k 4k</p> <p>a 2,10 2,08 1,80 1,98 1,98 1,08</p> <p>b 0,96 0,62 0,39 0,32 0,38 0,44</p> <p>c 1,95 2,00 2,44 2,85 2,84 2,43</p>
	<p>a Schrank, glatte Flächen, 1000 mm breit, 4 OH</p> <p>b Schrank, Akustik-Schiebetür (gelocht), glatte Rückwand, 1000 mm breit, 4 OH</p> <p>c Schrank, glatte Front, Akustik-Rückwand (gelocht), 1000 mm breit, 4 OH</p> <p>Oktav-Mittenfrequenz [Hz]</p> <p>125 250 500 1k 2k 4k</p> <p>a 0,79 0,41 0,25 0,23 0,21 0,20</p> <p>b 1,72 1,26 0,88 0,90 0,68 0,64</p> <p>c 1,29 1,33 0,99 0,99 0,84 0,87</p>
	<p>a Schrank, Akustik-Schiebetür und -Rückwand (gelocht), 1000 mm breit, 4 OH</p> <p>b wie a, direkt vor Hallraumwand stehend</p> <p>Oktav-Mittenfrequenz [Hz]</p> <p>125 250 500 1k 2k 4k</p> <p>a 1,93 2,10 1,60 1,59 1,32 1,31</p> <p>b 1,55 1,19 0,82 0,91 0,76 0,74</p>

Tabelle 8.8 Schallabsorptionfläche für Möbel und Einrichtungsgegenstände

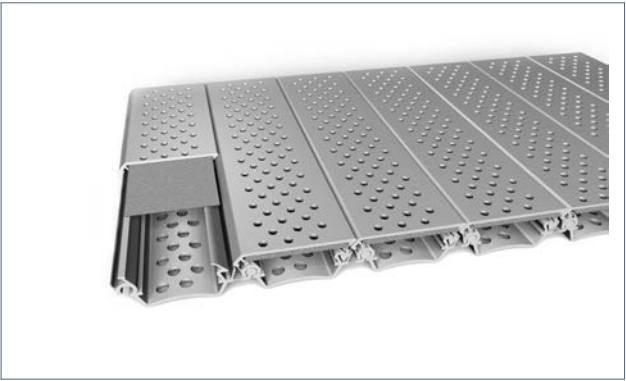


Abbildung 8.10 Perforiertes Möbelement
[Quelle: USM Möbelbausysteme]

Schränke	
Grafik Absorptionsfläche	Beschreibung und Absorptionswerte
	<p>a 3-stöckiger leerer Metall-Schrank, Maße (H×B×T): 1092×1525×375 mm, Oberflächen unperforiert</p> <p>b wie a, 50 % voll mit div. Büchern, Ordnern usw., Klapptüren außen und innen perforiert</p> <p>c wie a, leer, Klapptüren außen und innen perforiert</p> <p>Oktav-Mittenfrequenz [Hz] 125 250 500 1k 2k 4k</p> <p>a 0,85 0,49 0,36 0,23 0,14 0,11</p> <p>b 1,32 1,46 1,32 1,23 1,21 1,23</p> <p>c 1,26 1,39 1,14 1,14 1,02 1,03</p>
	<p>a 3-stöckiger leerer Schrank, Maße (H×B×T): 1092×1525×375 mm, Seitenwände, Rückwand unperforiert und Seitenwand perforiert, Klapptüren außen und innen perforiert</p> <p>b wie a, leer, Seitenwand und Rückwand perforiert – Klapptüren außen u. innen perforiert</p> <p>c wie b, Seitenwand und Rückwand perforiert , Klapptüren unperforiert</p> <p>Oktav-Mittenfrequenz [Hz] 125 250 500 1k 2k 4k</p> <p>a 1,71 2,00 1,67 1,65 1,58 1,61</p> <p>b 2,08 3,13 2,66 2,58 2,52 2,64</p> <p>c 1,81 2,59 1,80 1,77 1,59 1,58</p>

Tabelle 8.8 (Fortsetzung)

Abbildung 8.11 Schallab-sorbierender Rolladen mit Perforation und Vliesein-lage
[Quelle:
© Rehau AG + Co]



Stellwände	
Grafik Absorptionsfläche	Beschreibung und Absorptionswerte
	<div><div>a Stellwand gering absorbierend, Maße (H×B×T): 1024×1590×35 mm</div><div>b Stellwand absorbierend, Maße wie a</div><div>c Stellwand hoch absorbierend, Maße (H×B×T): 1024×1590×63 mm</div></div> <div>Oktav-Mittenfrequenz [Hz] 125 250 500 1k 2k 4k</div> <div>a 0,27 0,24 0,45 1,09 2,10 2,91</div> <div>b 0,52 0,91 1,56 2,03 2,44 2,84</div> <div>c 0,43 1,13 1,99 2,96 2,73 2,56</div>
	<div><div>a Stellwand, absorbierend, 1400×800×56 mm, außen 8 mm Vlies 1100 g/m³ mit Stoffbezug, 2 x 20 mm Vlieskern 650 g/m³, frei im Hallraum stehend</div><div>b Paneelsystem, absorbierend, 2015×1025×55 mm, frei im Hallraum liegend</div><div>c Stellwand, absorbierend, 1650x1200x50 mm, Vliesfüllung frei im Hallraum stehend</div></div> <div>Oktav-Mittenfrequenz [Hz] 125 250 500 1k 2k 4k</div> <div>a 0,45 1,19 1,63 1,95 2,05 2,19</div> <div>b 1,22 2,22 2,92 2,77 2,86 3,12</div> <div>c 1,03 2,77 2,46 2,86 2,92 3,17</div>

Tabelle 8.8 (Fortsetzung)

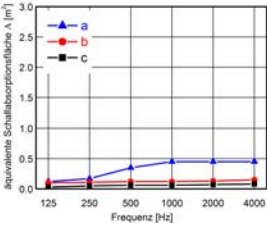
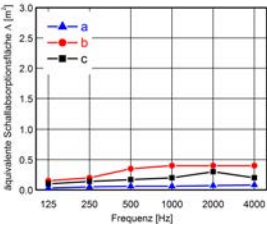
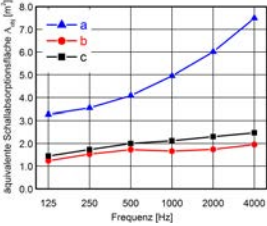
Personen, Sitzmöbel	
Grafik Absorptionsfläche	Beschreibung und Absorptionswerte
	<p>a 0,5 m² / Person sitzend auf ungepolsterter Bestuhlung</p> <p>b 0,5 m² / Person sitzend auf Leichtpolsterbestuhlung</p> <p>c 0,5 m² / Person sitzend auf Hochpolsterbestuhlung</p> <p>Oktav-Mittenfrequenz [Hz]</p> <p>125 250 500 1k 2k 4k</p> <p>a 0,12 0,17 0,35 0,45 0,45 0,45</p> <p>b 0,10 0,11 0,12 0,12 0,13 0,15</p> <p>c 0,03 0,05 0,06 0,06 0,07 0,08</p>
	<p>a Schüler in Unterrichtsräumen, 2,5 m² / Platz und ungepolsterten Stühlen</p> <p>b wie a, Kinder in Vorschuleinrichtungen</p> <p>c 6 m² / männliche Person im Anzug sitzend</p> <p>Oktav-Mittenfrequenz [Hz]</p> <p>125 250 500 1k 2k 4k</p> <p>a 0,15 0,20 0,35 0,40 0,40 0,40</p> <p>b 0,10 0,14 0,17 0,20 0,30 0,20</p> <p>c 0,15 0,25 0,55 0,80 0,90 0,90</p>
	<p>a schallabsorbierendes Sitzmöbel, 3-Sitzer, Maße (HxBxT): 1820x780x1500 mm, mit Stoffbezug und Lehne mit Aufsatz erhöht, schwere Konstruktion</p> <p>b schallabsorbierendes Sitzmöbel, Stoffbezug, ohne Aufsatz</p> <p>c wie b, Lehne mit Aufsatz erhöht</p> <p>Oktav-Mittenfrequenz [Hz]</p> <p>125 250 500 1k 2k 4k</p> <p>a 3,27 3,54 4,08 4,95 6,01 7,49</p> <p>b 1,24 1,53 1,73 1,66 1,74 1,95</p> <p>c 1,45 1,73 2,00 2,12 2,30 2,47</p>

Tabelle 8.8 (Fortsetzung)

8.2 Literaturverzeichnis

- [1] Absorptionsgradtabelle der PTB. Physikalisch-technische Bundesanstalt, <http://www.ptb.de>, dann Fachabteilung 1.6 Schall/1.63 Stand: 01/2019.
- [2] Adams, T.: Sound Materials. Amsterdam: Frame Publishers, 2016.
- [3] Ahnert, W.; Reichardt, W.: Grundlagen der Beschallungstechnik. Berlin: VEB Verlag Technik, 1981.
- [4] Ahnert, W.; Steffen, F.: Sound Reinforcement Engineering. London: E & FN Spon, 1999.
- [5] Altenmüller, E.: Vom Neandertal in die Philharmonie. Berlin: Springer, 2018.
- [6] Ansorge, D.: Schallschutz. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2011.
- [7] Apfel, R. E.: Deaf Architects and Blind Acousticians? New Haven: Apple Enterprises Press, 1998.
- [8] Arau-Puchades, H.: An Improved Reverberation Formula. *Acustica* (1988)(4), p. 163–180.
- [9] Arbeitsschutzgesetz vom 7. August 1996 (BGBl. I S. 1246), das zuletzt durch Artikel 427 der Verordnung vom 31. August 2015 (BGBl. I S. 1474) geändert worden ist), August 2015.
- [10] Arbeitsstättenverordnung vom 12. August 2004 (BGBl. I S. 2179), die zuletzt durch Artikel 5 Absatz 1 der Verordnung vom 18. Oktober 2017 (BGBl. I S. 3584) geändert worden ist.
- [11] ASTM C 423-17, Standard Test Method for Sound Absorption and Sound Absorption Coefficients by the Reverberation Room Method. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017, www.astm.org.
- [12] Attenborough, K.: Acoustical characteristics of rigid fibrous absorbents and granular materials. *J. Acoust. Soc. Am.* 73(1983)(3), p. 785–799.
- [13] Attenborough, K.: Models for the acoustical properties of air-saturated granular media. *Acustica/acta acustica* 1(1993)(1), p. 213–226.
- [14] Barron, M.: Auditorium Acoustics and Architectural Design. London: Spon Press, 2. überarb. Aufl., 2010.

- [15] Baumgartner, H.; Kurz, R.; Zimmermann, G. (Hrsg.): Mangelhafter Schallschutz von Gebäuden, Bd. 27 von Schadenfreies Bauen. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2002.
- [16] Beranek, L.: Music, Acoustics, Architecture. New York: John Wiley Sons, 1962.
- [17] Beranek, L.: Concert Halls and Opera Houses. New York: Springer, 2. Aufl., 2004.
- [18] Blauert, J.; Xiang, N.: Acoustics for Engineers. Berlin/Heidelberg: Springer, 2. Aufl., 2008.
- [19] Bobran, H. W.: Handbuch der Bauphysik, Schallschutz – Raumakustik – Wärmeschutz – Feuchtschutz. Köln: Rudolf Müller, 8., aktual. u. erw. Aufl., 2010.
- [20] Boldt, A.; Zöller, M.: Anerkannte Regeln der Technik - Inhalt eines unbestimmten Rechtsbegriffs. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2017.
- [21] Brooks, C. N.: Architectural Acoustics. Jefferson: Mc Farland and Company, 2003.
- [22] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) (Hrsg.): Leitfaden Barrierefreies Bauen, Berlin: Selbstverlag, 12 2016.
- [23] Burris-Meyer, H.; Goodfriend, L.: Acoustics for the Architect. New York: Reinhold, 1957.
- [24] Canning, D.; James, A.: The Essex Study – Optimised classroom acoustics for all. The Association of Noise Consultants, Mai 2012.
- [25] Cavanaugh, W. J.; Tocci, G.; Wilkes, J. A.: Architectural Acoustics. Hoboken: John Wiley & Sons, 1999.
- [26] Cowan, J.: Architectural Acoustics Design Guide. New York: Mc Graw-Hill, 2000.
- [27] Cox, T. J.; D’Antonio, P.: Acoustic Absorbers and Diffusers – Theory, Design and Application. Boca Raton: CRC Press, 3. Aufl., 2017.
- [28] Cremer, H.; Cremer, L.: Über die theoretischen Ableitungen der Nachhallgesetze – Teil II. Akustische Zeitschrift 2(1937)(6), p. 296–302.
- [29] Cremer, L.: Geometrische Raumakustik, Bd. 1. Stuttgart: S. Hirzel Verlag, 1948.

- [30] Cremer, L.: Die wissenschaftlichen Grundlagen der Raumakustik, Bd. 3. Stuttgart: S. Hirzel Verlag, 1950.
- [31] Cremer, L.: Statistische Raumakustik, Bd. 2. Stuttgart: S. Hirzel Verlag, 1961.
- [32] Cremer, L.; Müller, H. A.: Die wissenschaftlichen Grundlagen der Raumakustik: Geometrische Raumakustik, Statistische Raumakustik, Psychologische Raumakustik, Bd. I. Stuttgart: S. Hirzel Verlag, 1976.
- [33] Cremer, L.; Müller, H. A.: Die wissenschaftlichen Grundlagen der Raumakustik: Wellentheoretische Raumakustik, Bd. II. Stuttgart: S. Hirzel Verlag, 1976.
- [34] Deutsche Gesellschaft für das Badewesen e. V. -DGfdB-, Essen (Hrsg.) et al.: Richtlinien für den Bäderbau (5. Auflage). Koordinierungskreis Bäder, 2013.
- [35] Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V. (DGUV) (Hrsg.): DGUV Information BG/GUV-SI 8094 – Klasse(n)-Räume für Schulen; Empfehlungen für gesundheits- und lernfördernde Klassenzimmer. Berlin, Januar 2012.
- [36] Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V. (DGUV) (Hrsg.): DGUV Information 215-440 – Bildschirm- und Büroarbeitsplätze. Berlin, September 2015.
- [37] Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V. (DGUV) (Hrsg.): DGUV Information 215-441 – Büroraumplanung. Berlin, September 2016.
- [38] Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V. (DGUV) (Hrsg.): DGUV Information 215-443 – Akustik im Büro (bisher BGI 5141), in Überarbeitung. Berlin, September 2012.
- [39] Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V. (DGUV) (Hrsg.): DGUV BGIA Lärmschutz-Arbeitsblatt LSA 01-391 Akustische Raumgestaltung von Call Centern (BGI/GUV-I 792). Berlin, Oktober 2009.
- [40] Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V. (DGUV) (Hrsg.): DGUV Lärmschutz-Arbeitsblatt IFA-LSA 01-234 Raumakustik in industriellen Arbeitsräumen. Berlin, August 2014.
- [41] Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV) (Hrsg.): GUV-V S2 Unfallverhütungsvorschrift Kindertageseinrichtungen, Berlin, April 2009.
- [42] Deutscher Normenausschuss (DNA): Schallabsorptionsgrad-Tabelle. Berlin/Köln/Frankfurt/M.: Beuth Verlag, 1968.
- [43] DIN 1320:2009-12 Akustik – Begriffe. Berlin: Beuth-Verlag, Dezember 2009.
- [44] DIN 15906:2009-06 Tagungsstätten. Berlin: Beuth-Verlag, Juni 2009.

- [45] DIN 15996:2008-05 Bild- und Tonbearbeitung in Film-, Video- und Rundfunkbetrieben – Grundsätze und Festlegungen für den Arbeitsplatz. Beuth-Verlag, Mai 2008.
- [46] DIN 18032-4:2002-08 Hallen für Turnen, Spiele und Mehrzwecknutzung - Teil 4: Doppelschalige Trennvorhänge. Berlin: Beuth-Verlag, August 2002.
- [47] DIN 18040-1:2010-10 Barrierefreies Bauen – Planungsgrundlagen - Teil 1: Öffentlich zugängliche Gebäude. Berlin: Beuth-Verlag, Oktober 2010.
- [48] DIN 18040-2:2011-09 Barrierefreies Bauen – Planungsgrundlagen - Teil 2: Wohnungen. Berlin: Beuth-Verlag, September 2011.
- [49] DIN 18040-3:2014-12 Barrierefreies Bauen - Planungsgrundlagen - Teil 3: Öffentlicher Verkehrs- und Freiraum. Berlin: Beuth-Verlag, Dezember 2014.
- [50] DIN 18041:1968-10 Hörsamkeit in kleinen bis mittelgroßen Räumen. Berlin: Beuth-Verlag, Oktober 1968 [zurückgezogen].
- [51] DIN 18041:2004-05 Hörsamkeit in kleinen bis mittelgroßen Räumen. Berlin: Beuth-Verlag, Mai 2004 [zurückgezogen].
- [52] DIN 18041:2016-03 Hörsamkeit in Räumen – Anforderungen, Empfehlungen und Hinweise zur Planung. Berlin: Beuth-Verlag, März 2016.
- [53] DIN 4109:1989-11 Schallschutz im Hochbau – Anforderungen und Nachweise. Berlin: Beuth-Verlag, Nov. 1989 [zurückgezogen].
- [54] DIN 4109-1:2016-07 Schallschutz im Hochbau – Teil 1 : Mindestanforderungen. Berlin: Beuth-Verlag, Juli 2016 [zurückgezogen].
- [55] DIN 4109-1:2018-01 Schallschutz im Hochbau – Teil 1 : Mindestanforderungen. Berlin: Beuth-Verlag, Januar 2018.
- [56] DIN 4109 Beiblatt 2:1989-11 Schallschutz im Hochbau – Hinweise für Planung und Ausführung; Vorschläge für einen erhöhten Schallschutz; Empfehlungen für den Schallschutz im eigenen Wohn- und Arbeitsbereich. Berlin: Beuth-Verlag, November 1989 [zurückgezogen].
- [57] DIN 45641:1990-06 Mittelung von Schallpegeln. Berlin: Beuth-Verlag, Juni 1990.
- [58] DIN 45645-2:2012-09 Ermittlung von Beurteilungspegeln aus Messungen – Teil 2: Ermittlung des Beurteilungspegels am Arbeitsplatz bei Tätigkeit unterhalb des Pegelbereiches der Gehörgefährdung. Berlin: Beuth-Verlag, September 2012.

- [59] DIN 67700:2017-05 Bau von Bibliotheken und Archiven – Anforderungen und Empfehlungen für die Planung. Berlin: Beuth-Verlag, Mai 2017.
- [60] DIN/DEGA: Gemeinsame Stellungnahme des DIN-Arbeitskreises zur Überarbeitung der DIN 18041 und des Fachausschusses Bau- und Raumakustik der Deutschen Gesellschaft für Akustik zur Thematik tiefer Frequenzen in der Akustik kleiner bis mittelgroßer Räume, Juni 2014.
- [61] DIN EN 12354-6:2004-04 Bauakustik – Berechnung der akustischen Eigenschaften von Gebäuden aus den Bauteileigenschaften – Teil 6: Schallabsorption in Räumen; Deutsche Fassung EN 12354-6:2003. Berlin: Beuth-Verlag, April 2004.
- [62] DIN EN 60268-16:2012-05 Elektroakustische Geräte – Teil 16: Objektive Bewertung der Sprachverständlichkeit durch den Sprachübertragungsindex; (IEC 60268-16:2011); Deutsche Fassung EN 60268-16:2011). Berlin: Beuth-Verlag, Mai 2012.
- [63] DIN EN 61672-1:2003-10 Elektroakustik – Schallpegelmesser Teil 1: Anforderungen; (IEC 61672-1:2002); Deutsche Fassung EN 61672-1:2003). Berlin: Beuth-Verlag, Oktober 2003.
- [64] DIN EN ISO 10534-1:2001-10 Akustik – Bestimmung des Schallabsorptionsgrades und der Impedanz in Impedanzrohren – Teil 1: Verfahren mit Stehwellenverhältnis (ISO 10534-1:1996); Deutsche Fassung EN ISO 10534-1:2001. Berlin: Beuth-Verlag, Oktober 2001.
- [65] DIN EN ISO 10534-2:2001-10 Akustik – Bestimmung des Schallabsorptionsgrades und der Impedanz in Impedanzrohren – Teil 2: Verfahren mit Übertragungsfunktion (ISO 10534-2:1998); Deutsche Fassung EN ISO 10534-2:2001. Berlin: Beuth-Verlag, Oktober 2001.
- [66] DIN EN ISO 11654:1997-07 Schallabsorber für die Anwendung in Gebäuden – Bewertung der Schallabsorption (ISO 11654:1997); Deutsche Fassung EN ISO 11654:1997. Berlin: Beuth-Verlag, Juli 1997.
- [67] E DIN EN ISO 11654:2018-05 Akustik – Schallabsorber – Bewertung von Schallabsorptionsgraden (ISO/DIS 11654:2017); Deutsche und Englische Fassung prEN ISO 11654:2018. Berlin: Beuth-Verlag, Mai 2018.
- [68] DIN EN ISO 17624:2005-03 Akustik – Leitfaden für den Schallschutz in Büros und Arbeitsräumen durch Schallschirme (ISO 17624:2004); Deutsche Fassung EN ISO 17624:2004. Berlin: Beuth-Verlag, März 2005.

- [69] DIN EN ISO 3382-1:2009-10 Akustik – Messung von Parametern der Raumakustik – Teil 1: Aufführungsräume (ISO 3382-1:2009); Deutsche Fassung EN ISO 3382-1:2009. Berlin: Beuth-Verlag, Oktober 2009.
- [70] DIN EN ISO 3382-2: 2008-09 Akustik – Messung von Parametern der Raumakustik – Teil 2: Nachhallzeit in gewöhnlichen Räumen (ISO 3382-2:2008); Deutsche Fassung EN ISO 3382-1:2008. Berlin: Beuth-Verlag, September 2008, (Achtung: DIN EN ISO 3382-2 Berichtigung 1, September 2009).
- [71] DIN EN ISO 3382-3:2012-05 Akustik – Messung von Parametern der Raumakustik – Teil 3: Großraumbüros (ISO 3382-3:2012); Deutsche Fassung EN ISO 3382-3:2012. Berlin: Beuth-Verlag, Mai 2012.
- [72] DIN EN ISO 354:2003-12 Akustik – Messung der Schallabsorption in Hallräumen (ISO 354:2003); Deutsche Fassung EN ISO 354:2003. Berlin: Beuth-Verlag, Dezember 2003.
- [73] DIN ISO 226:2006-04 Akustik – Normalkurven gleicher Lautstärkepegel (ISO 226:2003). Berlin: Beuth-Verlag, April 2006.
- [74] DIN EN ISO 11690-1:1997-02 Richtlinien für die Gestaltung lärmarmer maschinenbestückter Arbeitsstätten – Teil 1: Allgemeine Grundlagen (ISO 11690-1:1996); Deutsche Fassung EN ISO 11690-1:1996. Berlin: Beuth-Verlag, Februar 1997.
- [75] DIN EN ISO 11690-3:1999-01 Richtlinien für die Gestaltung lärmarmer maschinenbestückter Arbeitsstätten – Teil 3: Schallausbreitung und -vorausberechnung in Arbeitsräumen (ISO/TR 11690-3:1997); Deutsche Fassung EN ISO 11690-3:1998. Berlin: Beuth-Verlag, Januar 1999.
- [76] DIN EN ISO 226:1997-08 Akustik – Normfrequenzen (ISO 266:1997); Deutsche Fassung EN ISO 266:1997. Berlin: Beuth-Verlag, August 1997.
- [77] DIN EN ISO 9612:2009-09 Akustik – Bestimmung der Lärmexposition am Arbeitsplatz – Verfahren der Genauigkeitsklasse 2 (Ingenieurverfahren) (ISO 9612:2009); Deutsche Fassung EN ISO 9612:2009. Berlin: Beuth-Verlag, September 2009.
- [78] DIN EN ISO 9921:2004-02 Ergonomie – Beurteilung der Sprachkommunikation (ISO 9921:2003); Deutsche Fassung EN ISO 9921:2003. Berlin: Beuth-Verlag, Februar 2004.
- [79] Egan, M. D.: Architectural Acoustics. Fort Lauderdale: J. Ross, 2007.

- [80] Engl, J.: Raum und Bauakustik, ein Leitfaden für Architekten und Ingenieure. Leipzig: Akademische Verlagsgesellschaft, 1939.
- [81] Eyring, C. F.: Reverberation time in »dead« rooms. J. Acoust. Soc. Am. 1(1930)(1), p. 217 – 241.
- [82] Fasold, W.; Kraak, W.; Schirmer, W.: Taschenbuch Akustik (Teil 2), Bd. (Teil1). Berlin: VEB Verlag Technik, 1984.
- [83] Fasold, W.; Sonntag, E.: Bauphysikalische Entwurfslehre, Bd. 4. Berlin: VEB Verlag Bauwesen, 3. überarb. Aufl., 1978.
- [84] Fasold, W.; Veres, E.: Schallschutz und Raumakustik in der Praxis. Berlin: Verlag Bauwesen, 2. überarb. Aufl., 2003.
- [85] Fasold, W.; Winkler, H.: Bau- und Raumakustik Bauphysikalische Entwurfslehre. Berlin: VEB Verlag Bauwesen, 1987.
- [86] Fastl, H.; Zwicker, E.: Psychoacoustics. Berlin/Heidelberg: Springer, 3. Aufl., 2006.
- [87] Fischer, H.-M.; Schneider, M.: Handbuch zu DIN 4109 – Schallschutz im Hochbau. Berlin: Beuth Verlag, 2019.
- [88] Fitzroy, D.: Reverberation Formula Which Seems to Be More Accurate with Nonuniform Distribution of Absorption. J. Acoust. Soc. Am. 31(1959)(7), p. 893 – 897.
- [89] Fouad, N. A. (Hrsg.): Bauphysik Kalender; Schallschutz und Akustik. Berlin: Ernst & Sohn Verlag, 2009.
- [90] Fraunhofer-Institut für Bauphysik (Hrsg.): - Richtlinie Akustik in Lebensräumen für Erziehung und Bildung. Stuttgart: Selbstverlag, 2015.
- [91] Fuchs, H.: Schallabsorber und Schalldämpfer (4. Auflage 2017 mit neuem Titel: Raum-Akustik und Lärm-Minderung). Springer, 3. Aufl., 2010.
- [92] Furrer, W.: Raum- und Bauakustik für Architekten. Basel/Stuttgart: Birkhäuser-Verlag, 1956.
- [93] Ganten, H.; Kindereit, E.; Busse, F.: Typische Baumängel, Bd. 82. München: C.H. Beck, 2010 (NJW-Praxis; 82).
- [94] Garai, M.: Measurement of the sound-absorption coefficient in situ: the reflection method using periodic pseudo-random sequences of maximum length. Applied Acoustics 39(1993)(1/2), p. 119–139.

- [95] Gumpert, J.: Raumakustik-Simulation von Parametern zur Charakterisierung von Mehrpersonenbüros. Bachelorarbeit, Jade Hochschule Oldenburg (unter Verschluss), 2018.
- [96] Hanus, K.: Der Einfluß der Raumakustik auf die bauliche Gestaltung. Technische Hochschule Stuttgart, 1956.
- [97] Hartmann, G.: Praktische Akustik. Einführung, Bd. 1. München/Wien: R. Oldenbourg Verlag, 1964.
- [98] Hartmann, G.: Praktische Akustik. Raum- und Bauakustik, Bd. 2. München/Wien: R. Oldenbourg Verlag, 1968.
- [99] Heckl, M.; Müller, H. A.: Taschenbuch der Technischen Akustik. Berlin/Heidelberg: Springer Verlag, 2. Aufl., 1994.
- [100] Hellbrück, J.; Guski, R.: Lauter Schall – Wie Lärm in unser Leben eingreift. Darmstadt: wbg Academic, 2018.
- [101] Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie (Hrsg.): Lärminderung in Schulen. Umwelt und Geologie. Lärmschutz in Hessen, (4), 2007.
- [102] Hettler, S.: Technische Regelwerke zum Schallschutz. Berlin: Beuth Verlag, 2018.
- [103] HOAI 2013 - Honorarordnung für Architekten und Ingenieure vom 10. Juli 2013 (BGBl. I S. 2276), Juli 2013.
- [104] Hund Broschüre Akustiksysteme. Hund Büromöbel GmbH, 2008.
- [105] Hunt, F. V.: The absorption coefficient problem. J. Acoust. Soc. Am. 11(1939)(1), p. 38–40.
- [106] ISO 17497-1:2005-05 Acoustics – Sound Scattering Properties of Surfaces; Part 1: Measurement of the random-incidence scattering coefficient in a reverberation room, Mai 2005.
- [107] ISO 17497-2:2012-05 Acoustics – Sound Scattering Properties of Surfaces; Part 2: Measurement of the directional diffusion coefficient in a free field, Mai 2012.
- [108] ISO 20189:2018-11 Akustik – Stellwände und einzelne Objekte zur Verwendung in Innenräumen – Auslegung der Schallabsorption und Schalldämmung von Bauteilen aufgrund von Messungen im Prüfstand, November 2018 [deutsche Ausgabe in Vorbereitung].

- [109] ISO 9613-1: Acoustics - Attenuation of sound during propagation outdoors - Part 1: Calculation of the absorption of sound by the atmosphere, 1993.
- [110] Kalivoda, M. T.; Steiner, J. W. (Hrsg.): Taschenbuch der angewandten Psychoakustik. Wien/New York: Springer, 1998.
- [111] Kath, U.: Ein Hallraum-Ringversuch zur Bestimmung des Absorptionsgrades. *Acustica* 52(1983)(4), p. 211–215.
- [112] Kelz, P.: Ringversuch zur raumakustischen Messung von Großraumbüros gemäß DIN EN ISO 3382-3. *DAGA* 2018, p. 402–404.
- [113] Kleiner, M.; Tichy, J.: *Acoustics of Small Rooms*. Boca Raton: CRC Press, 2014.
- [114] Knudsen, V. O.: *Architectural Acoustics*. Hoboken: John Wiley & Sons, 1932.
- [115] Kosten, C. W.: International comparison measurements in the reverberation room. *Acustica* 10(1960)(5-6), p. 400–411.
- [116] Kurze, U. J.: Erfahrungen mit Schallschirmen in Arbeitsräumen. Forschungsbericht BAUA Nr. 168, Bremerhaven: Wirtschaftsverlag NW, 1977.
- [117] Kurze, U. J.; Nürnberger, H.: Schallschirme für Fertigungs- und Büroräume. Forschungsbericht BAUA Nr. 896, Bremerhaven: Wirtschaftsverlag NW, 2000.
- [118] Kuttruff, H.: *Room acoustics*. London: Elsevier, 3. Aufl., 1991.
- [119] Kuttruff, H.: *Akustik, eine Einführung*. Stuttgart: S. Hirzel Verlag, 2004.
- [120] Kuttruff, H.: *Room Acoustics*. Boca Raton: CRC Press, 6. Aufl., 2017.
- [121] Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung vom 6. März 2007 (BGBl. I S. 261), die zuletzt durch Artikel 2 der Verordnung vom 15. November 2016 (BGBl. I S. 2531) geändert worden ist.
- [122] Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung vom 6. März 2007 (BGBl. I S. 261), die zuletzt durch Artikel 3 der Verordnung vom 19. Juli 2010 (BGBl. I S. 960) geändert worden ist.
- [123] Lärmprävention in Kindertageseinrichtungen. Landesunfallkasse Nordrhein-Westfalen; Rheinischer Gemeindeunfallversicherungsverband; Gemeindeunfallversicherungsverband; Westfalen-Lippe; Berufsgenossenschaft für Gesundheitsdienst und Wohlfahrtspflege (BGW), April 2007.
- [124] Landau, L. D.; Lifschitz, E. M.: *Hydrodynamik*. Berlin: Akademie Verlag, 5. Aufl., 1991.

- [125] Landesamt für Gesundheit und Soziales - Abteilung Gesundheit, Dezernat Umwelthygiene / Umweltmedizin, Mecklenburg-Vorpommern (Hrsg.): Leitfa-
den zur Raumakustik in Unterrichts- und Gruppenräumen. Anleitung zur DIN
18041 »Hörsamkeit in kleinen bis mittelgroßen Räumen« Rostock: Selbstver-
lag (schon 2003 erschienen), Oktober 2011.
- [126] Lazarus, H.; Sust, C.; Steckel, R.; Kurtz, P.: Akustische Grundlagen sprachli-
cher Kommunikation. Berlin/Heidelberg/New York: Springer, 2007.
- [127] Lerch, R.; Sessler, G.; Wolf, D.: Technische Akustik. Berlin/Heidelberg: Sprin-
ger, 2009.
- [128] Lips, W.: Lärmbekämpfung in der Haustechnik, Bd. 594. Renningen: Expert
Verlag, 3. Aufl., 2002.
- [129] Locher-Weiß, S.: Baurechtliche Schriften: Rechtliche Probleme des Schall-
schutzes, Rechtsfragen mit technischer Einführung, Bd. 3. München: Werner-
Verlag, 4. völlig neu bearb.u. erw. Aufl., 2004.
- [130] Lottermoser, W.: Orgeln, Kirchen und Akustik, Bd. 1. Frankfurt am Main: Er-
win Bochinsky, 1983.
- [131] Lottermoser, W.: Orgeln, Kirchen und Akustik, Bd. 2. Frankfurt am Main: Er-
win Bochinsky, 1983.
- [132] Maa, D.-Y.: Non-uniform acoustical boundaries in rectangular rooms.
J. Acoust. Soc. Am. 12(1940)(1), p. 39–52.
- [133] Maue, J. H.: 0 Dezibel + 0 Dezibel = 3 Dezibel. Berlin: Erich Schmidt Verlag,
2009.
- [134] Mechel, F. P.: Schallabsorber – Äußere Schallfelder, Wechselwirkungen, Bd. 1.
Stuttgart: S. Hirzel Verlag, 1989.
- [135] Mechel, F. P.: Schallabsorber – Innere Schallfelder, Strukturen, Bd. 2. Stuttgart:
S. Hirzel Verlag, 1995.
- [136] Mechel, F. P.: Schallabsorber – Anwendungen, Bd. 3. Stuttgart: S. Hirzel Ver-
lag, 1998.
- [137] Mechel, F. P.: Raumakustische Felder. Stuttgart: S. Hirzel Verlag, 2009.
- [138] Mehta, M.: Architectural Acoustics. Principles and Design. Upper Saddle Ri-
ver, N.J.: Prentice-Hall, 1999.

- [139] Meis, M.; Klink, K.: Schall- und Lärmwirkung Fachschrift Nr. 11, 2. Aufl., Wiesbaden: Industriefachverband Büro und Arbeitswelt e.V. (IBA), 2016.
- [140] Meyer, E.; Neumann, E. G.: Physikalische und technische Akustik. Braunschweig: Friedr. Vieweg & Sohn, 1967.
- [141] Meyer, E.; Neumann, E.-G.: Physikalische und technische Akustik. Braunschweig: Vieweg, 2. bericht. u. erw. Aufl., 1974.
- [142] Meyer, J.: Fachbuchreihe Das Musikinstrument. Akustik und musikalische Aufführungspraxis: Leitfaden für Akustiker, Tonmeister, Musiker, Instrumentenbauer und Architekten, Bd. 24. Frankfurt am Main: Erwin Bochinsky, 3. vollst. überarb. und erw. Aufl., 1995.
- [143] Meyer, J.: Fachbuchreihe Das Musikinstrument: Kirchenakustik, Bd. 76. Frankfurt am Main: Erwin Bochinsky, 2003.
- [144] Michel, E.: Hörsamkeit großer Räume. Braunschweig: Friedr. Vieweg & Sohn, 1921.
- [145] Millington, G.: A modified formula for reverberation. J. Acoust. Soc. Am. 4(1932)(1), p. 69–82.
- [146] Moll, W.; Moll, A.: Schallschutz im Wohnungsbau. Gütekriterien, Möglichkeiten, Konstruktionen. Berlin: Ernst und Sohn Verlag, 2011.
- [147] Mommertz, E.: Untersuchung akustischer Wandeigenschaften und Modellierung der Schallrückwürfe in der binauralen Raumsimulation. Dissertation, RWTH Aachen, 1995.
- [148] Mommertz, E.: Akustik und Schallschutz. München: Edition Detail, 2008.
- [149] Morse, P. M.; Bolt, R. H.: Sound Waves in Rooms. Lancaster: American Physical Society, 1944.
- [150] Morse, P. M.; Bolt, R. H.; Brown, R. L.: Acoustic impedance and sound absorption. J. Acoust. Soc. Am. 12(1940)(2), p. 217–227.
- [151] Möser, M.: Technische Akustik. Heidelberg/Dordrecht: Springer, 8. aktual. Aufl., 2009.
- [152] Möser, M.: Messtechnik der Akustik. Berlin/Heidelberg: Springer, 2010.
- [153] Müller, A.: Schallschutz in der Praxis. Grundlagen - Recht - Fallbeispiele. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2009.

- [154] Müller, G.; Möser, M. (Hrsg.): Handbook of Engineering Acoustics. Berlin/Heidelberg: Springer, 2013.
- [155] Nocke, C.: Improved impedance deduction from measurements near grazing incidence. *Acustica/acta acustica* 85(1999)(4), p. 586–590.
- [156] Nocke, C.: In-situ acoustic impedance measurement using a free-field transfer function method. *Applied Acoustics* 59(2000)(3), p. 253–264.
- [157] Nocke, C.: In-situ Messung der akustischen (Wand-) Impedanz. Dissertation, Universität Oldenburg, 2000.
- [158] Nocke, C.: Akustikmöbel – Modellierung zur Simulation. *Lärmbekämpfung* 12(2017)(6), p. 199–202.
- [159] Nocke, C.; Meis, M.: Akustik in Büro und Objekt – Dokumentation des 2. Symposiums Büro. Raum. Akustik Köln 2011. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2013.
- [160] Nocke, C.; Meyer, T.; Freese, N.; Eilers, I.: Schallabsorptionsgrad von Einzelobjekten. *Fortschritte der Akustik – DAGA 2014*, Berlin: Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V. (DEGA), p. 443.
- [161] Nocke, C.; Ruhe, C.; Kirchner, T.; Moll, A.; Neubauer, R.: Hörsamkeit in Räumen: Kommentar zu DIN 18041. Berlin: Beuth-Verlag, 2018.
- [162] Petzold, E.: Elementare Raumakustik. Berlin: Bauwelt Verlag, 1927.
- [163] Probst, W.; Böhm, M.: Die Anwendung des Speech Transmission Index (STI) zur Beurteilung von Sprachgeräuschen. *Lärmbekämpfung* 12(2017)(1), p. 57–65.
- [164] Probst, W.; Böhm, M.: Die STI-Matrix - ein Verfahren zur Bewertung und Beurteilung von Restaurants, Büros und anderen Aufenthaltsräumen. *Lärmbekämpfung* 13(2018)(2), p. 64–69.
- [165] Reichardt, W.: Gute Akustik – aber wie? Berlin: VEB Verlag Technik Berlin, 1979.
- [166] Sabine, W. C.: Collected Papers on Acoustics. Los Altos: Peninsula Publishing, 1964.
- [167] Schick, A.: Schall aus psychologischer Sicht. Stuttgart: Klett-Cotta, 1979.
- [168] Schick, A.: Akustik zwischen Physik und Psychologie. Stuttgart: Klett-Cotta, 1981.

- [169] Schick, A.; Klatte, M.; Meis, M.; Nocke, C.: Beiträge zur psychologischen Akustik. Ergebnisse des neunten Oldenburger Symposiums zur Psychologischen Akustik – Hören in Schulen. Oldenburg: BIS-Verlag, 2003.
- [170] Schick, A.; Meis, M.; Nocke, C.: Beiträge zur Psychologischen Akustik. Ergebnisse des zehnten Oldenburger Symposiums zur Psychologischen Akustik – Akustik in Büro und Objekt. Oldenburg: Isensee Verlag, 2010.
- [171] Schricker, R.: Kreative Raum-Akustik für Architekten und Designer. Stuttgart: Deutsche Verlags-Anstalt, 2001.
- [172] Seibel, M.: Baumängel und anerkannte Regeln der Technik. Handbuch für Baujuristen. München: C. H. Beck, 2009.
- [173] Seibel, M.; Müller, A.: Schallschutz. In: Baurechtliche und -technische Themensammlung (Arbeitshefte für Baujuristen und Sachverständige nach Gewerken sortiert; 1) Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2011.
- [174] Sette, W. H.: A new reverberation time formula. J. Acoust. Soc. Am. 4(1933), p. 69–82.
- [175] SGA – SSA Schweizerische Gesellschaft für Akustik: Beschallungsanlagen für Sprache – Empfehlungen für Architekten und Bauherrschaften, Januar 2001.
- [176] Späh, M.; Zha, X.; Nocke, C.; Jiang, G.: Measurement of effective absorption at low frequencies. Proc. of Euronoise 98, p. 781–786.
- [177] Spandöck, F.: Experimentelle Untersuchung der akustischen Eigenschaften von Baustoffen durch die Kurztonmethode. Annalen der Physik 5(1934)(20), p. 328–344.
- [178] Sturmhoefel, A.: Akustik des Baumeisters oder der Schall im begrenzten Raum. Berlin: Schuster & Bufleb, 1894.
- [179] Technische Regeln für Arbeitsstätten ASR A1.2 Raumabmessungen und Bewegungsflächen (zuletzt geändert GMBI 2018, S. 471), September 2013.
- [180] Technische Regeln für Arbeitsstätten ASR A3.7 Lärm, Mai 2018.
- [181] Technische Regeln für Arbeitsstätten ASR V3 Gefährdungsbeurteilung, Juli 2017.
- [182] Technische Regeln für Arbeitsstätten ASR V3a.2 Barrierefreie Gestaltung von Arbeitsstätten (zuletzt geändert GMBI 2018, S. 469), Aug. 2012.

- [183] Technische Regeln zur Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung -Teil: Allgemeines, Januar 2010.
- [184] Technische Regeln zur Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung - Teil 1: Beurteilung der Gefährdung durch Lärm, Januar 2010.
- [185] Technische Regeln zur Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung - Teil 2: Messung von Lärm, Januar 2010.
- [186] Technische Regeln zur Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung - Teil 3: Lärmschutzmaßnahmen, Januar 2010.
- [187] Umweltbundesamt: Innenraumlufthygiene-Kommission des Umweltbundesamtes (Hrsg.): Moriske, H.-J. ; Szewzyk, J. Leitfaden für die Innenraumhygiene in Schulgebäuden. Berlin: Umweltbundesamt, 2008.
- [188] Umweltministerium Baden-Württemberg(Hrsg.): Fraunhofer IBP Lärmschutz für kleine Ohren. Leitfaden zur akustischen Gestaltung von Kindertagesstätten, Stuttgart: Selbstverlag, 2009.
- [189] VDI 2058 Blatt 3: Beurteilung von Lärm am Arbeitsplatz unter Berücksichtigung unterschiedlicher Tätigkeiten. Verein deutscher Ingenieure, August 2014.
- [190] VDI 2081 Blatt 1: Geräuscherzeugung und Lärminderung in Raumluftechnischen Anlagen. Beuth Verlag, Juli 2001.
- [191] VDI 2569: Schallschutz und akustische Gestaltung im Büro. Verein deutscher Ingenieure, Januar 1990.
- [192] VDI 2569 (Entwurf 2016): Schallschutz und akustische Gestaltung im Büro. Verein Deutscher Ingenieure, Februar 2016.
- [193] VDI 2569: Schallschutz und akustische Gestaltung im Büro. Verein Deutscher Ingenieure, 2019.
- [194] VDI 2720 Blatt 2: Schallschutz durch Abschirmung in Räumen. Verein deutscher Ingenieure, April 1983.
- [195] VDI 3755: Schalldämmung und Schallabsorption abgehängter Unterdecken. Verein deutscher Ingenieure, Januar 2015.
- [196] VDI 4100: Schallschutz im Hochbau; Wohnungen Beurteilung und Vorschläge für einen erhöhten Schallschutz. Berlin: Beuth Verlag, Oktober 2012.

- [197] Vorländer, M.: Auralization: Fundamentals of Acoustics, Modelling, Simulation, Algorithms and Acoustic Virtual Reality (RWTH edition). Berlin/Heidelberg: Springer, 2008.
- [198] Weinzierl, S.: Beethovens Konzerträume: Raumakustik und symphonische Aufführungspraxis an der Schwelle zum modernen Konzertwesen. Frankfurt am Main: Erwin Bochinsky, 2002.
- [199] Weinzierl, S. (Hrsg.): Handbuch der Audiotechnik. Berlin/Heidelberg: Springer, 2008.
- [200] Weisse, K.: Leitfaden der Raumakustik für Architekten. Berlin: Verlag d. Druckhauses Tempelhof, 1949.
- [201] Werner, R.: Einflüsse raumakustischer Faktoren auf das Musikhören in Kirchen. Berlin: Merseburger, 1970.
- [202] Wittstock, V.: Unsicherheiten bei der Messung des Absorptionsgrads im Hallraum. DAGA 2014.
- [203] Xiang, N. (Hrsg.): Architectural Acoustics Handbook. Plantation, FL: J. Ross Publishing, 2017.
- [204] Zha, X.; Fuchs, H. V.; Späh, M.: Messung des effektiven Absorptionsgrades in kleinen Räumen. Rundfunktechnische Mitteilungen 40(1996)(3), p. 77–83.
- [205] Zha, X.; V.Fuchs, H.; Nocke, C.; Han, X.: Measurement of an effective absorption coefficient below 100 Hz. Acoustics Bulletin 24(1999)(1), p. 5–10.
- [206] Zorkoczy, L.: Hörsamkeit in Kirchen. Berlin: Merseburger, 1976.
- [207] Zwicker, E.; Feldtkeller, R.: Das Ohr als Nachrichtenempfänger. Stuttgart: S. Hirzel Verlag, 2. neubearb. Aufl., 1967.

8.3 Abkürzungsverzeichnis

Zeichen	Beschreibung	Einheit
α	physikalischer Schallabsorptionsgrad	1
$\bar{\alpha}$	mittlerer Schallabsorptionsgrad (Frequenzmittelung)	1
α_0	Schallabsorptionsgrad für senkrechten Schalleinfall	1
α_{eff}	effektiver Schallabsorptionsgrad	1
α_{obj}	Schallabsorptionsgrad der Oberflächen eines Objektes	1
α_p	praktischer Schallabsorptionsgrad	1
α_θ	Schallabsorptionsgrad für schrägen Schalleinfall	1
α_S	Sabinescher Schallabsorptionsgrad	1
α_{spec}	spiegelnder Schallabsorptionsgrad	1
α_{st}	Schallabsorptionsgrad für statistischen oder diffusen Schalleinfall	1
α_w	bewerteter Schallabsorptionsgrad (Einzahlwert)	1
ΔA	zusätzliche äquivalente Schallabsorptionsfläche	m ²
A	äquivalente Absorptionsfläche eines Raums	m ²
A_{eq}	äquivalente Absorptionsfläche eines flächigen Absorbers	m ²
$A_{\text{eq},i}$	äquivalente Teilabsorptionsfläche	m ²
A_{obj}	äquivalente Absorptionsfläche eines Objektes	m ²
A_T	äquivalente Absorptionsfläche des Prüfobjekts	m ²
c	Schallgeschwindigkeit	m/s
C_{80}	Klarheitsmaß	dB
Δ_n	A-Bewertung	dB
$D_{2,S}$	räumliche Abklingrate des A-bewerteten Schalldruckpegels für Sprache	dB
D_{50}	Deutlichkeit	%
D_p	Einfügungs-Schalldruckpegeldifferenz	dB
D_{pA}	A-bewertete Einfügungs- Schalldruckpegeldifferenz	dB
D_z	Freifeld-Abschirmmaß	dB
$D_{z,r}$	reduziertes Abschirmmaß	dB
EDT	frühe Abklingzeit	s
f	Frequenz	Hz
f_g	Grenzfrequenz	Hz

Zeichen	Beschreibung	Einheit
f_m	Mittenfrequenz	Hz
f_n	Eigenfrequenz	Hz
f_o	obere Frequenzgrenze	Hz
f_u	untere Frequenzgrenze	Hz
G	Stärkemaß	dB
h	lichte Raumhöhe	m
J_{LF}, J_{LFC}	früher seitlicher Energieanteil	s
k	Volumenkennzahl	m ³
K_I	Impulszuschlag	dB
K_T	Zuschlag für Ton- und Informationshaltigkeit	dB
λ	Wellenlänge	m
$L_{AF}(t)$	zeitabhängiger Schalldruckpegel	dB
L_{Δ}	Minderung des Schalldruckpegels	dB
L_{ges}	Gesamt-Schalldruckpegel	dB
L_i	Gesamtpegel von n gleichen Schalldruckpegeln	dB
L_j	der n-te Schalldruckpegel	dB
L_J	später seitlicher Schalldruckpegel	dB
$L_{NA,Bau}$	Störschalldruckpegel der bauseitigen Geräusche	dB
L_p	Schalldruckpegel	dB
$L_p(r)$	Schalldruckpegel in Abhängigkeit vom Abstand r von der Quelle	dB
$L_{p,A,B}$	Schalldruckpegel der Fremdgeräusche	dB
$L_{p,A,S,4\text{ m}}$	bewerteter Schalldruckpegel der Sprache in einem Abstand von 4 m	dB
L_{pAeq}	äquivalenter Dauerschallldruckpegel	dB
$L_{p,diff}$	Schalldruckpegel im Diffusfeld des Raums	dB
L_r	Beurteilungspegel	dB
L_w	Schallleistungspegel	dB
$m_{1,2}$	Luftabsorptionskoeffizient mit Klimabedingungen	Np/m
n	Anzahl der Objekte	
N	Anzahl der Arbeitsplätze in großem Mehrpersonenbüro	
NRC	Noise Reduction Coefficient (Einzahlwert)	1
p	Schalldruck	Pa
p_0	Referenzschalldruck	20 μ Pa
r	Abstand	m
r_D	Ablenkungsabstand	m
r_H	Hallradius	m

Zeichen	Beschreibung	Einheit
r_p	Vertraulichkeitsabstand	m
s	Streugrad für statistischen Schalleinfall	1
S	überdeckte Fläche des Prüfobjekts	m ²
SAA	Sound Absorption Average (Einzahlwert)	1
STI	Sprachübertragungsindex	1
ST _{early}	frühe Unterstützung	dB
ST _{late}	späte Unterstützung	dB
ϑ	Lufttemperatur	°C
T ₁	Nachhallzeit des leeren Hallraums	s
T ₂	Nachhallzeit des leeren Hallraums mit Prüfobjekt	s
T ₃	Nachhallzeit des leeren Hallraums, wiederholte Messung	s
T ₄	Nachhallzeit des leeren Hallraums mit Prüfobjekt, wiederholte Messung	s
T ₂₀	Nachhallzeit, Abklingen von 5 dB bis 25 dB unter Anfangspegel	s
T ₃₀	Nachhallzeit, Abklingen von 5 dB bis 35 dB unter Anfangspegel	s
T _{Eyr}	Nachhallzeit nach Eyringscher Formel	s
T _{max}	maximale Nachhallzeit	s
T _S	Schwerpunktzeit	m s
T _{Soll, Flur}	Soll-Nachhallzeit für Flure	s
T _{Soll, A1}	Soll-Nachhallzeit für Nutzungsart A5 »Musik«	s
T _{Soll, A2}	Soll-Nachhallzeit für Nutzungsart A5 »Sprache / Vortrag«	s
T _{Soll, A3}	Soll-Nachhallzeit für Nutzungsart A5 »Unterricht / Kommunikation«	s
T _{Soll, A4}	Soll-Nachhallzeit für Nutzungsart A5 »Unterricht / Kommunikation inklusiv«	s
T _{Soll, A5}	Soll-Nachhallzeit für Nutzungsart A5 »Sport«	s
V	Raumvolumen	m ³
Ξ	längenspezifischer Strömungswiderstand	Pa · s/m ²
z	Weglängendifferenz	m

8.4 Stichwortverzeichnis

A

Abklingrate	
räumliche	115, 152
Ablenkungsabstand	115, 157
Abschirmung	105, 181, 215
Absorptionsfläche	75, 82
äquivalente	75, 147, 188, 206, 211
Absorber	83
Objekt	75, 83, 190, 277
Prüfobjekt	75
Raum	84, 189
Absorptionsgrad	63, 185, 227
Abstandsgesetz	19, 101
Akustikmodell	227, 253
Alarmierung	175
Anforderung	
raumakustische	121, 125
Arbeitsschutz	14, 34, 40, 41, 122, 158
ASR A3.7	159
Außenlärm	52
Aufbautypen	92
Auralisation	185, 234

B

Bauakustik	52, 147
Bauen	
barrierefreies	122
Beurteilungspegel	43, 123

D

Dämpfungskoeffizient	190
Dauerschallpegel	43, 159
Dezibel	18, 31

Differenzierungsraum	127
Diffusion	61
DIN 18041	54, 121, 124, 184
Raum Gruppe A	125
Raum Gruppe B	126
Direktschall	97, 101, 181, 206, 215, 234
Dynamik	18, 32

E

Echo	102, 105
Echogramm	100
Echoschwelle	39
Eigenfrequenz	203
Einzahlwert	115
Einzelbüro	148, 149
Empfehlung	151
Elektroakustik	21

F

Flachraum	58
Flatterecho	102, 140, 185
Flur	169
Fremdgeräuschpegel	116
Frequenz	13, 23, 37
Norm-Frequenz	28
tiefe	143, 203

G

Geräusch	29
Gesamtpegel	22, 23
Gesamtstörschallpegel	135
Grenzfrequenz	57, 204

Großraumbüro 111, 115
Messweg 116, 153

H

Hörbereich 25, 31
Hörfläche 32
Hörsamkeit 125, 135, 144, 148, 182
Hörschwelle 32
Halligkeit 146
Hallradius 206, 212, 219
Hallraum 144
Messverfahren 71
HOAI 238

I

Impulsantwort 100, 102, 110, 234
Messung 119
Infraschall 25
Inklusion 122
Isophone 32

K

Körperschall 15
Klang 28
Klarheitsmaß 110
Kugelschallquelle 17, 19, 119, 206,
211, 212, 228
Kundtsches Rohr 69

L

Lärmbelastung 123
Lärmwirkung 40, 148
Langraum 58
Lautheit 34, 36

Lombard-Effekt 213
Luftdruck 16
Luftschaall 15

M

Maskierung 46, 107, 148, 163
Mehrpersonenbüro 146, 148, 151, 181
großes 147, 151, 152
kleines 151
Mehrzwecknutzung 132
Messung
baubegleitende 185
Nachhallzeit 117, 188
raumakustische 117
Streugrad 81
Mittenfrequenz 28
Musik
unverstärkte 128
Musiknutzung 133

N

Nachhallformel
Arau 208
Eyring 208
Fitzroy 208
Millington 208
Sabinesche 63, 181, 182, 188
Sette 208
Nachhallkurve 104, 198
Nachhallzeit 95, 99, 113, 129, 149,
181, 188, 193
allgemeine Definition 204
Berechnung 184
Frequenzverlauf 104, 130
maximale 149
Messung 102
Soll- 130

Toleranzbereich	132, 244, 246
Zielbereich	184, 193
Nachweis	134
Nutzungsart	126, 128, 135, 244, 265, 268, 270
A1 bis A5	128
B1 bis B5	135

diffuse	61, 142
frühe	101
geometrische	61
späte	101
Regel der Technik	
allgemein anerkannte	121, 143
Richtwert	123

O

Oktave	28, 188
--------	---------

P

Parameter	
raumakustische	184
Pegelkarte	222
Pegelverteilung	222
Planung	181, 182, 185
raumakustische	130
Porosität	66
Prüfzeugnis	77–79
Primärstruktur	98
Psychoakustik	31, 36
Punktschallquelle	17

R

Raumakustik	52, 147
geometrische	56
statistische	56
wellentheoretische	56
Raumakustikklasse	152
Raumform	55, 96, 184
Raummode	56, 72, 203
Raummodell	
dreidimensionales	185
Raumresonanz	56, 203
Reflexion	58, 59, 100, 101

S

Schallabsorber	59, 142
allgemein	62
einzelner	72
flächenhafter	72
poröser	64, 65
Resonanz-	64, 67
Schallabsorberklasse	87
Schallabsorption	61, 135
Schallabsorptionsgrad	63, 69, 75, 190, 277
bewerteter	85, 277
Bezugskurve	85
Einzahlangabe	85
Formindikator	86
Hallraum	71
Messung	69
NRC	89, 277
Objekt	90
physikalisch	63
praktischer	85
SAA-Wert	89
sabinescher	63
Schallausbreitung	53, 100, 142, 212, 220
Schalldruck	16
Schalldruckpegel	18
Sprache	115
Schallfeld	63
diffuses	56, 58, 181, 188, 202, 212
nicht-diffuses	58

Schallgeschwindigkeit	20, 207
Schallimmissionsschutz	52
Schallleistungspegel	211
Schalllenkung	61, 143
Schallpegel	13, 22, 23, 28, 33, 34, 36, 37, 43, 95, 116, 210, 211
Schallschirm	215
Schallschutz	52, 53, 147
Schallstrahl	56, 102
Schallwelle	55, 59
Reflexion	59
Schirmung	152, 157
Schwimmhalle	169, 174, 273
Sekundärstruktur	98
Simulation	
raumakustische	227
Verfahren	145
Spektrum	28
Spielflure	268
Sporthalle	169, 269
Sprach-Kommunikation	25
Sprache	30
Sprachpegel	
4 m	152
normierter	211
Sprachspektrum	
normiertes	115
Sprachübertragungsindex	105, 123
Sprachverständlichkeit	95, 104, 106, 116, 148, 175
Mindest-	175
STI	105, 109, 229
Bereiche	106, 109
Matrix	229
Messung	120
Schirmung	220
Strömungswiderstand	66
längenspezifischer	66
Streugrad	228
Streuung	61, 142

T

Terz	28, 188
Ton	28
Tonhöhe	37
Treppenhaus	169
TRLV Lärm 3	94, 167, 179

U

Ultraschall	25
Umweltbundesamt	169
Unterrichtsraum	127, 169
UVV Kindertageseinrichtungen	170

V

VDI 2569	146
Vertraulichkeitsabstand	115
Verwischungsschwelle	38
Volumenkennzahl	96, 97

W

Wahrnehmbarkeitsschwelle JND	
Pegel	36
STI	107
Wellenlänge	24, 25, 56
Wirkung	
aurale	40, 123
extraaurale	40

Z

Zeitbewertung	38
---------------	----

Danksagung zur 2. Auflage

Erfreulicherweise ist schon nach gut zweieinhalb Jahren die erste Auflage des Buchs verkauft gewesen. Statistisch gesehen könnte man nun die Aussage treffen, dass nahezu jeden Tag ein Exemplar des Buchs gekauft wurde. Das Interesse an »guter Akustik« scheint somit ungebrochen zu sein, wobei gerade statistische Betrachtungen auch in der Akustik ab und an mit Vorsicht zu genießen sind. Der erste Dank geht somit an alle bisherigen und zukünftigen Leserinnen und Leser.

Eine Neuauflage erfordert Zeit, die gerade im Jahr 2018 aufgrund verschiedener Ereignisse wenig vorhanden war. Weiterhin besteht meinerseits der Anspruch, dass eine Neuauflage auch aktuelle Entwicklungen aufgreift.

Wie schon in der ersten Auflage geht ein großer Dank an Nils Freese, Meike Scheicht, Tiedo Meyer, Ina Eilers, Christian Schröder, Christina Imbery und Jörn Gumpert im Akustikbüro Oldenburg. Eine besonderer Dank geht nach Gilching und gilt Dr. Wolfgang Probst sowie Fabian Probst von der DataKustik GmbH für die fortwährende Unterstützung in vielen weiteren Belangen.

Sehr herzlich danken möchte ich Herrn Professor Dr. August Schick für die Bereitschaft, das Vorwort der 2. Auflage zu verfassen. Sein besonderes und fortwährendes Interesse am Akustikbüro begann mit einem Projekt zu Klassenräumen [169], einem offenbar immer noch aktuellen Thema.

Der größte Dank gilt wie zuvor meiner Frau!

Oldenburg, im März 2019

Christian Nocke

Danksagung

In diesem Buch wird eine Reihe von verschiedenen Aspekten aus meiner Arbeit als Akustiker zusammenfassend dargestellt. Ich hoffe, dass diese Zusammenstellung als hilfreich empfunden wird. Sie wäre in dieser Form sicherlich nicht entstanden, wenn nicht ab und an immer noch Räume mit akustischen Defiziten erstellt würden. Mein Dank gilt daher allen Leserinnen und Lesern mit Interesse an »guter Akustik«, auch wenn eine zu große Leserschaft dazu führen könnte, dass mein Tätigkeitsbereich sich ändern wird.

Seit der Gründung des Akustikbüros in Oldenburg gemeinsam mit Dr. Catja Hilge im Jahr 2000 ist die Raumakustik ein Thema mit kontinuierlich zunehmender Bedeutung geworden. Das Oldenburger Umfeld im Auditory Valley, aber auch schon vorher in der Arbeitsgruppe Akustik unter Leitung von Professor Dr. Volker Mellert, hat die Gründung und den Ausbau des Akustikbüros fortwährend gefördert. Ein besonderer Dank gilt Volker Mellert, dem »Vater« der Oldenburger Akustik.

Ohne die Absolventen der Universität, die den Weg ins Akustikbüro Oldenburg gefunden haben, wäre dieses Buch nicht möglich geworden. Ein weiterer Dank gilt daher Herrn Dipl.-Physiker Nils Freese, Herrn Dipl.-Physiker Tiedo Meyer, Frau M.Sc. Ina Eilers, Herrn B.Sc. Christian Schröder und Herrn B.Sc. Robert Müller-Rhein. Die fortwährende Verbindung zwischen Akustikbüro und Universität wird dankenswerter Weise von Frau Meike Scheicht gehalten.

Der größte Dank gilt meiner Frau!

Oldenburg, im Juli 2014

Christian Nocke

Christian Nocke

Raumakustik im Alltag

Hören – Planen – Verstehen

2., überarbeitete und erweiterte Auflage

Welche Faktoren beeinflussen die Akustik eines Raumes? Wie gelingt es optimale Sprachverständlichkeit und Hörsamkeit zu schaffen?

Der Autor gibt Antwort auf diese und viele weitere Fragen und vermittelt das Verständnis für die Zusammenhänge der Raumakustik. Er beschreibt die raumakustischen Grundlagen, Kenngrößen und Anforderungen und veranschaulicht, wie im Planungsprozess die oft vernachlässigten raumakustischen Gestaltungsmöglichkeiten Berücksichtigung finden. Dabei geht es insbesondere um Räume des Alltags wie Schulen, Büros, Restaurants oder Mehrzweckhallen, in denen durch wirksame Maßnahmen die akustischen Bedingungen sowohl im Neubau als auch im Bestand optimiert werden können.

Die überarbeitete Neuauflage wurde an die aktuellen Regelwerke (DIN 18041, VDI 2569, ASR A3.7) angepasst und durch weitere Projektbeispiele aus der Praxis sowie ein neues Kapitel zur Simulation von Schallausbreitung ergänzt.

»(...) eine hervorragende Planungshilfe für alle Menschen, die mit der Architektur, dem Bau oder dem Design der Räumlichkeiten befasst sind, in denen wir uns Tag für Tag aufhalten.«

Aus dem Vorwort zur ersten Auflage von
Prof. Dr. Volker Mellert, Oldenburg im Juni 2014

Dr. rer. nat. Dipl.-Phys. Christian Nocke war nach dem Studium der Physik am Fraunhofer-Institut für Bauphysik tätig. Im Jahr 2000 gründete er das Akustikbüro Oldenburg und leitete von 2001 bis 2004 die Geschäftsstelle der Deutschen Gesellschaft für Akustik – DEGA e.V. 2015 gründete er die Schall & Raum Consulting GmbH zur softwarebasierten Planung von Büroakustik. Als Fachplaner, ö.b.u.v. Sachverständiger für Lärmimmission, Bau- und Raumakustik und Berater begleitet er Produktentwicklungen und führt weltweit Schulungen und Vorträge durch. Für seine Verdienste um die Normung der Raumakustik wurde er 2019 mit der Rudolf-Martin-Ehrenurkunde des NALS im DIN ausgezeichnet.

ISBN 978-3-8167-9896-5

