

DIN EN 12354-6

DIN

ICS 91.120.20

**Bauakustik –
Berechnung der akustischen Eigenschaften von Gebäuden aus den
Bauteileigenschaften –
Teil 6: Schallabsorption in Räumen;
Deutsche Fassung EN 12354-6:2003**

Building acoustics –
Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements –
Part 6: Sound absorption in enclosed spaces;
German version EN 12354-6:2003

Acoustique du bâtiment –
Calcul de la performance acoustique des bâtiments à partir de la performance des
éléments –
Partie 6: Absorption acoustique des pièces et espaces fermés;
Version allemande EN 12354-6:2003

Gesamtumfang 28 Seiten

Normenausschuss Bauwesen (NABau) im DIN
Normenausschuss Materialprüfung (NMP) im DIN



Die Europäische Norm EN 12354-6:2003 hat den Status einer Deutschen Norm.

Nationales Vorwort

Diese Europäische Norm wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 126 „Akustische Eigenschaften von Baustoffen und Bauteilen und von Gebäuden“ (Sekretariat: AFNOR) erarbeitet.

Der für die deutsche Mitarbeit zuständige Arbeitsausschuss im DIN Deutsches Institut für Normung e. V. ist der Arbeitsausschuss 00.71.00 „Schallschutz im Hochbau“ des Normenausschusses Bauwesen (NABau).

ICS 91.120.20

Deutsche Fassung

**Bauakustik — Berechnung der akustischen Eigenschaften von
Gebäuden aus den Bauteileigenschaften —
Teil 6: Schallabsorption in Räumen**

Building acoustics — Estimation of acoustic performance
of buildings from the performance of elements —
Part 6: Sound absorption in enclosed spaces

Acoustique du bâtiment — Calcul de la performance
acoustique des bâtiments à partir de la performance des
éléments — Partie 6: Absorption acoustique des pièces et
espaces fermés

Diese Europäische Norm wurde vom CEN am 13. November 2003 angenommen.

Die CEN-Mitglieder sind gehalten, die CEN/CENELEC-Geschäftsordnung zu erfüllen, in der die Bedingungen festgelegt sind, unter denen dieser Europäischen Norm ohne jede Änderung der Status einer nationalen Norm zu geben ist. Auf dem letzten Stand befindliche Listen dieser nationalen Normen mit ihren bibliographischen Angaben sind beim Management-Zentrum oder bei jedem CEN-Mitglied auf Anfrage erhältlich.

Diese Europäische Norm besteht in drei offiziellen Fassungen (Deutsch, Englisch, Französisch). Eine Fassung in einer anderen Sprache, die von einem CEN-Mitglied in eigener Verantwortung durch Übersetzung in seine Landessprache gemacht und dem Management-Zentrum mitgeteilt worden ist, hat den gleichen Status wie die offiziellen Fassungen.

CEN-Mitglieder sind die nationalen Normungsinstitute von Belgien, Dänemark, Deutschland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Island, Italien, Luxemburg, Malta, den Niederlanden, Norwegen, Österreich, Portugal, Schweden, der Schweiz, der Slowakei, Spanien, der Tschechischen Republik, Ungarn und dem Vereinigten Königreich.



EUROPÄISCHES KOMITEE FÜR NORMUNG
EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION
COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION

Management-Zentrum: rue de Stassart, 36 B-1050 Brüssel

Inhalt

	Seite
Vorwort	3
1 Anwendungsbereich	4
2 Normative Verweisungen	4
3 Benötigte Größen	4
4 Rechenmodelle	6
4.1 Allgemeine Grundlagen	6
4.2 Eingangsdaten	6
4.3 Bestimmung der gesamten äquivalenten Absorptionsfläche	7
4.4 Bestimmung der Nachhallzeit	8
4.5 Interpretation	9
4.6 Einschränkungen	9
5 Genauigkeit	9
Anhang A (normativ) Übersicht der verwendeten Symbole	10
Anhang B (informativ) Schallabsorption von Materialien	13
B.1 Beispiele	13
B.2 Berechnung	14
Anhang C (informativ) Schallabsorption durch Objekte	16
Anhang D (informativ) Berechnung für unregelmäßige Raumformen und/oder Absorptionsverteilungen	18
D.1 Einleitung	18
D.2 Unregelmäßige Absorptionsverteilung	18
D.3 Unregelmäßig ausgebildete Räume	21
Anhang E (informativ) Rechenbeispiel	24
Literaturhinweise	26

Vorwort

Dieses Dokument (EN 12354-6:2003) wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 126 „Akustische Eigenschaften von Baustoffen und Bauteilen und von Gebäuden“ erarbeitet, dessen Sekretariat vom AFNOR gehalten wird.

Diese Europäische Norm muss den Status einer nationalen Norm erhalten, entweder durch Veröffentlichung eines identischen Textes oder durch Anerkennung bis Juni 2004, und etwaige entgegenstehende nationale Normen müssen bis Juni 2004 zurückgezogen werden.

Dieses Dokument ist die erste Fassung einer Norm, die einen Teil einer Reihe von Normen zur Festlegung von Rechenmodellen in der Bauakustik darstellt:

- *Teil 1: Luftschalldämmung zwischen Räumen*
- *Teil 2: Trittschalldämmung zwischen Räumen*
- *Teil 3: Luftschalldämmung gegen Außenlärm*
- *Teil 4: Schallübertragung von Räumen ins Freie*
- *Teil 5: Geräusche von haustechnischen Anlagen und Geräten*
- *Teil 6: Schallabsorption in Räumen*

Obwohl dieser Teil der Norm die am häufigsten vorkommenden Typen von umschlossenen Räumen (im Folgenden Räume genannt) in Gebäuden einschließt, kann er derzeit noch nicht alle Variationen dieser Räume abdecken. Die Norm beschreibt eine Herangehensweise für das Sammeln von Erfahrungen, die der zukünftigen Verbesserung und Entwicklung der Norm dienen können.

Die Genauigkeit dieser Norm kann erst nach umfassenden Vergleichen von in Gebäuden gemessenen Daten im Einzelnen festgelegt werden, wobei diese Daten wiederum über einen gewissen Zeitraum der Anwendung des Vorhersagemodells ermittelt werden müssen. Um dem Anwender in der Zwischenzeit behilflich sein zu können, sind Angaben über die Genauigkeit enthalten, die auf vergleichbaren Vorhersagemodellen beruhen. Es liegt in der Verantwortung des Anwenders (d. h. einer Person, einer Organisation, der Behörden), die Folgen der allen Mess- und Vorhersageverfahren innewohnenden Genauigkeit zu berücksichtigen, Anforderungen an die Eingabedaten festzulegen und/oder einen Sicherheitsabstand für die Ergebnisse oder andere Korrekturen anzuwenden.

Anhang A ist normativ, die Anhänge B, C, D und E sind informativ.

Entsprechend der CEN/CENELEC-Geschäftsordnung sind die nationalen Normungsinstitute der folgenden Länder gehalten, diese Europäische Norm zu übernehmen: Belgien, Dänemark, Deutschland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Island, Italien, Luxemburg, Malta, Niederlande, Norwegen, Österreich, Portugal, Schweden, Schweiz, Slowakei, Spanien, Tschechische Republik, Ungarn und Vereinigtes Königreich.

1 Anwendungsbereich

Diese Europäische Norm legt ein Rechenmodell zur Ermittlung der äquivalenten Gesamt-Schallabsorptionsfläche oder der Nachhallzeit von Räumen in Gebäuden fest. Die Berechnung beruht hauptsächlich auf Messdaten, die die Schallabsorption von Materialien und Objekten beschreiben. Die Berechnungen können nur in Frequenzbändern erfolgen.

In dieser Europäischen Norm werden die Grundlagen des Rechenmodells beschrieben, die entsprechenden benötigten Größen aufgeführt sowie die Anwendung und die Beschränkungen des Modells festgelegt. Die Norm ist für Fachleute auf dem Gebiet der Akustik bestimmt und gibt den Rahmen für die Entwicklung von Anwendungsdokumenten und Hilfsmitteln für sonstige Anwender auf dem Gebiet des Hochbaus unter Berücksichtigung der örtlichen Bedingungen vor.

Das Modell beruht auf Erfahrungen mit Vorhersagen für Räume, wie Wohnräume und Büros, und für allgemein genutzte Räume in Gebäuden, wie Treppenhäuser, Korridore und Räume für Maschinen und technischen Einrichtungen. Es ist nicht für sehr große oder unregelmäßig ausgebildete Räume, wie Konzerthallen, Theater und Werkshalle, vorgesehen.

2 Normative Verweisungen

Diese Europäische Norm enthält durch datierte oder undatierte Verweisungen Festlegungen aus anderen Publikationen. Diese normativen Verweisungen sind an den jeweiligen Stellen im Text zitiert, und die Publikationen sind nachstehend aufgeführt. Bei datierten Verweisungen gehören spätere Änderungen oder Überarbeitungen dieser Publikationen nur zu dieser Europäischen Norm, falls sie durch Änderung oder Überarbeitung eingearbeitet sind. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe der in Bezug genommenen Publikation (einschließlich Änderungen).

EN ISO 354, *Akustik — Messung der Schallabsorption in Hallräumen (ISO 354:2003)*.

ISO 9613-1, *Acoustics — Attenuation of sound during propagation outdoors — Part 1: Calculation of the absorption of sound by the atmosphere*.

3 Benötigte Größen

3.1 Gebäudeeigenschaften

3.1.1

Größen zur Angabe der Gebäudeeigenschaften

die Schallabsorption in Räumen kann nach prEN ISO 3382-2 in Form der äquivalenten Absorptionsfläche oder der Nachhallzeit angegeben werden. Diese Größen werden in Frequenzbändern (Terz- oder Oktavbändern) ermittelt

3.1.2

äquivalente Schallabsorptionsfläche eines Raumes, A

hypothetische Fläche einer vollständig absorbierenden Oberfläche ohne Beugungseffekte, die, falls sie das einzige absorbierende Element im Raum wäre, dieselbe Nachhallzeit wie der betrachtete Raum ergeben würde

ANMERKUNG Die äquivalente Schallabsorptionsfläche eines Raumes wird in m^2 angegeben.

3.1.3

Nachhallzeit, T

die Zeit, die erforderlich ist, damit der Schalldruckpegel um 60 dB sinkt, nachdem die Schallquelle verstummt ist

ANMERKUNG 1 Die Nachhallzeit wird in s angegeben.

ANMERKUNG 2 Die Definition von T mit einem Abfall des Schalldruckpegels um 60 dB kann durch lineare Extrapolation eines kürzeren Beurteilungsbereiches erfolgen.

ANMERKUNG 3 Wenn eine Abklingkurve nicht monoton ist, wird die Nachhallzeit durch die Zeiten festgelegt, zu denen die Abklingkurve zum ersten Mal 5 dB beziehungsweise 25 dB unter dem Ausgangspegel liegt. Im Zweifelsfall sollte diese Nachhallzeit mit T_{20} gekennzeichnet werden.

3.2 Bauteileigenschaften

3.2.1 Größen zur Angabe der Bauteileigenschaften

die Schallabsorption von Bauteilen nach EN ISO 354 kann als die äquivalente Schallabsorptionsfläche oder der Schallabsorptionsgrad angegeben werden. Diese Größen werden in Terzbändern bestimmt und können auch in Oktavbändern angegeben werden

ANMERKUNG Nach EN ISO 11654 [7] kann auch eine Einzahlangabe für die Bauteileigenschaft aus den Frequenzbanddaten gewonnen werden, z. B. $\alpha_w(M)$. Diese Einzahlangaben können für den Vergleich oder die Festlegung der geforderten Produkteigenschaft verwendet, dürfen jedoch nicht direkt für die Berechnung der Eigenschaft unter den tatsächlichen Bedingungen eingesetzt werden.

3.2.2

äquivalente Schallabsorptionsfläche eines Objekts, A_{obj}

Differenz zwischen der jeweiligen äquivalenten Schallabsorptionsfläche mit bzw. ohne Objekt (Probekörper) im Prüfraum

ANMERKUNG Die äquivalente Schallabsorptionsfläche eines Objekts wird in m^2 angegeben.

3.2.3

Schallabsorptionsgrad, α_s

die äquivalente Schallabsorptionsfläche eines Probekörpers, dividiert durch dessen Oberfläche

ANMERKUNG 1 Im Falle von ebenen Absorbern mit zwei exponierten Seiten bezieht sich diese Größe auf jede Seite als ein Mittelwert über beide Seiten.

ANMERKUNG 2 Diese Größe gilt nur für einen flachen Absorber oder eine festgelegte Anordnung von Objekten und nicht für einzelne Objekte.

3.2.4

weitere benötigte Angaben

für die Berechnungen können zusätzliche Angaben erforderlich sein, z. B.:

- die Fläche der raumbegrenzenden Bauteile;
- das Volumen und die Form des umschlossenen Raumes (im Folgenden Raum genannt);
- die Menge und Art der Objekte und Einrichtungen im Raum;
- die angenommene Anzahl der im Raum befindlichen Personen

3.3 Weitere Begriffe und Größen

3.3.1

Luftabsorption, A_{air}

äquivalente Absorptionsfläche der Schalldämpfung durch Luft

3.3.2

Volumen des leeren Raumes, V

Volumen des Raumes ohne Objekte und Befestigungen

3.3.3

Objektvolumen, V_{obj}

Volumen der kleinsten regelmäßig ausgebildeten Umhüllung eines Objektes unter Vernachlässigung kleiner Bauteile, die über die Umhüllung hervorsteht

ANMERKUNG Ein Beispiel für kleine hervorstehende, vernachlässigbare Bauteile sind die Beine eines Tisches.

3.3.4

Objektanteil, Ψ

Verhältnis der Summe der Volumenanteile aller Objekte zum Volumen des leeren Raumes

3.3.5

Objektanordnung

spezifische Anordnung von Objekten, deren Absorption durch einen Schallabsorptionsgrad α_s im Verhältnis zu der durch die Anordnung abgedeckten Oberfläche angegeben wird

4 Rechenmodelle

4.1 Allgemeine Grundlagen

Für die Berechnung der äquivalenten Schallabsorptionsfläche und der Nachhallzeit in Räumen wird ein diffuses Schallfeld angenommen. Das bedeutet, dass die Abmessungen des Raumes in gleicher Größenordnung sind (siehe 4.6) und die Absorption über den Raum verteilt ist; das Vorhandensein schallstreuender Objekte führt zu weniger starken Einschränkungen. Die Wirkung der Absorption durch Oberflächen, durch Objekte — einschließlich Personen — durch Objektanordnungen und durch die Luft wird berücksichtigt.

ANMERKUNG 1 Für andere Situationen, wie unregelmäßig ausgebildete Räume und unregelmäßige Absorptionsverteilung, enthält Anhang D eine Anleitung für verbesserte Rechenmodelle. Bei unregelmäßig ausgebildeten Räumen, z. B. Treppenhäuser oder Räume mit Maschinen, wird angenommen, dass der Schalldruckpegel, und damit die Absorption, die Eigenschaften besser charakterisiert als die Nachhallzeit.

Das Modell kann zur Berechnung der Gebäudeeigenschaften in Frequenzbändern, auf der Grundlage frequenzabhängiger Bauteilangaben verwendet werden. Die Berechnung erfolgt üblicherweise in Oktavbändern im Frequenzbereich von 125 Hz bis 4 000 Hz.

ANMERKUNG 2 Die Berechnungen können auf höhere oder niedrigere Frequenzen ausgeweitet werden. Jedoch liegen derzeit insbesondere für die niedrigeren Frequenzen keine Angaben zur Genauigkeit der Berechnungen für diese erweiterten Frequenzbereiche vor.

Eine Übersicht der in den Modellen verwendeten Symbole ist in Anhang A angegeben.

4.2 Eingangsdaten

Die äquivalente Absorptionsfläche und die Nachhallzeit können aus Folgendem bestimmt werden:

- dem Absorptionsgrad der Oberfläche i : $\alpha_{s,i}$;
- dem Inhalt der Oberfläche i : S_i ;
- der äquivalenten Absorptionsfläche des Objekts j : $A_{\text{obj},j}$;
- dem Absorptionsgrad der Objektanordnung k : $\alpha_{s,k}$;
- der von der Objektanordnung abgedeckten Oberfläche k : S_k ;
- dem Volumen des leeren Raumes: V ;
- dem Volumen des Objektes j oder der Objektanordnung k : $V_{\text{obj},j}$, $V_{\text{obj},k}$.

Die akustischen Daten zu den betreffenden Materialien, Objekten und Objektanordnungen sollten vorrangig durch genormte Prüfstandsmessungen nach EN ISO 354 ermittelt werden. Sie können jedoch auch auf anderem Wege abgeleitet werden, durch die Anwendung theoretischer Berechnungen, empirischer Abschätzungen oder der Ergebnisse von Messungen in Gebäuden. Die verwendeten Datenquellen müssen deutlich angegeben werden.

Die Eingangsdaten für Berechnungen in Oktavbändern können als der arithmetische Mittelwert der entsprechenden Terzbandwerte angenommen werden.

ANMERKUNG Die Verwendung des arithmetischen Mittelwertes der Terzbandwerte als Eingangswert für die Berechnungen in Oktavbändern kann sich für andere Absorber als die Breitbandabsorber als ungenau erweisen.

Angaben zur Schallabsorption einiger Materialien und Oberflächenbehandlungen sind in Anhang B enthalten.

Angaben zur Schallabsorption einiger typischer Objekte sind in Anhang C enthalten.

4.3 Bestimmung der gesamten äquivalenten Absorptionsfläche

Die äquivalente Absorptionsfläche des gesamten Raumes ergibt sich aus:

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

Dabei ist

- n die Anzahl der Oberflächen i ;
- o die Anzahl der Objekte j ;
- p die Anzahl der Objektanordnungen k .

Die äquivalente Absorptionsfläche für die Luftabsorption ergibt sich aus:

$$A_{\text{air}} = 4mV(1 - \Psi) \quad (2)$$

Dabei ist

- m der Leistungs-Dämpfungskoeffizient in Luft, in Neper je Meter;
- V das Volumen des leeren Raumes, in Kubikmeter;
- Ψ der Objektanteil.

Der Objektanteil ergibt sich aus:

$$\Psi = \frac{\sum_{j=1}^o V_{\text{obj},j} + \sum_{k=1}^p V_{\text{obj},k}}{V} \quad (3)$$

Die Schalldämpfung durch Luftübertragung wird in ISO 9613-1 als eine Funktion der Temperatur, der Luftfeuchte und der Frequenz festgelegt. Für die Schallübertragung in Räumen enthält Tabelle 1 die entsprechenden Werte für übliche Bedingungen, die in Übereinstimmung mit der genannten Norm ermittelt wurden. Wenn andere besondere Bedingungen gelten, sind die Werte des Leistungs-Dämpfungskoeffizienten nach ISO 9613-1 zu bestimmen. Sofern keine Bedingungen festgelegt sind, wird die Anwendung der Werte empfohlen, die bei 20 °C und einer Luftfeuchte von 50 % bis 70 % gelten.

Sind die Berechnungen auf das 1 000-Hz-Oktavband als höchste Frequenz und auf Räume mit Volumen von weniger als 200 m³ begrenzt, kann die Absorption durch Luft vernachlässigt werden und ist Gleichung (1) mit $A_{\text{air}} = 0 \text{ m}^2$ anzuwenden.

Bei harten, unregelmäßig ausgebildeten Objekten, z. B. Maschinen, Lagerregale oder Büromöbel, kann die äquivalente Absorptionsfläche von Bedeutung sein, ist jedoch üblicherweise nicht durch Messungen zu bestimmen. Für die Anwendung der vorliegenden Norm kann die äquivalente Absorptionsfläche eines solchen harten Objekts durch folgende Gleichung aus dessen Volumen berechnet werden:

$$A_{\text{obj}} = V_{\text{obj}}^{2/3} \tag{4}$$

Dabei ist

V_{obj} das Volumen der harten Objekte.

ANMERKUNG Hierbei handelt es sich um eine empirische Gleichung, mit der zuverlässige Ergebnisse für Räume mit einer relativ hohen Anzahl von Objekten erhalten werden, wie z. B. in Räumen mit technischen Einrichtungen.

4.4 Bestimmung der Nachhallzeit

Die Nachhallzeit wird aus der nach 4.3 berechneten gesamten äquivalenten Schallabsorptionsfläche, dem Volumen des leeren Raumes und dem Objektanteil bestimmt:

$$T = \frac{55,3}{c_0} \frac{V(1-\Psi)}{A} \tag{5}$$

Dabei ist

c_0 die Schallgeschwindigkeit in Luft, in Meter je Sekunde.

ANMERKUNG Für das wie in EN ISO 140-4 [8] mit 0,16 angenommene Verhältnis $55,3/c_0$ ist die Schallgeschwindigkeit mit 345,6 m/s anzunehmen.

Tabelle 1 — Schalleistungs-Dämpfungskoeffizient in Luft, m , in Oktavbändern, in Abhängigkeit von Temperatur und Luftfeuchte

	m in 10^{-3} Neper je Meter, für Oktavbänder mit Mittenfrequenz in Hz						
	125	250	500	1k	2k	4k	8k
10 °C, 30 % bis 50 % Luftfeuchte	0,1	0,2	0,5	1,1	2,7	9,4	29,0
10 °C, 50 % bis 70 % Luftfeuchte	0,1	0,2	0,5	0,8	1,8	5,9	21,1
10 °C, 70 % bis 90 % Luftfeuchte	0,1	0,2	0,5	0,7	1,4	4,4	15,8
20 °C, 30 % bis 50 % Luftfeuchte	0,1	0,3	0,6	1,0	1,9	5,8	20,3
20 °C, 50 % bis 70 % Luftfeuchte	0,1	0,3	0,6	1,0	1,7	4,1	13,5
20 °C, 70 % bis 90 % Luftfeuchte	0,1	0,3	0,6	1,1	1,7	3,5	10,6

ANMERKUNG Diese Werte werden aus den Tabellen in ISO 9613-1 mit dem Schalldämpfungskoeffizient der atmosphärischen Absorption in Dezibel je Kilometer für Terzbänder abgeleitet, indem die Werte in diesen Tabellen durch $4,343 (= 10 \lg e)$ dividiert werden. Die Werte für die Oktavbänder sind die für das mittlere Terzband unter 1 kHz und die für das untere Terzband über 1 kHz. Die Werte werden linear über die Luftfeuchte im angegebenen Bereich gemittelt.

4.5 Interpretation

- das Modell ist auf regelmäßig ausgebildete Räume in Gebäuden mit einer annehmbaren Verteilung der Absorptionsmaterialien und einigen streuenden harten oder absorbierenden Objekten, wie sie in üblichen Wohnräumen und Büros anzutreffen sind, anwendbar. In diesen Räumen kann die Absorption durch Luft vernachlässigt werden, und der Volumenanteil wird üblicherweise für leer stehende Räume $\Psi < 0,05$ und für möblierte Räume $0,05 \leq \Psi \leq 0,2$ sein;
- in Räumen mit technischen Einrichtungen oder Maschinen kann der von den Objekten, selbst den harten, belegte Volumenanteil, ebenso wie die Luftabsorption, sehr wichtig sein. Wenn jedoch der Volumenanteil sehr groß ist, kann der freie Raum wahrscheinlich nicht als ein einzelner Raum betrachtet werden, und das Modell ist daher möglicherweise nicht gültig; siehe Anhang D;
- harte Objekte oder Objektanordnungen sind nur von Bedeutung, wenn ihre Maße die Wellenlänge überschreiten, so dass Objekte mit Maßen unter 1 m üblicherweise vernachlässigt werden können;
- in allgemein genutzten Räumen in Gebäuden, z. B. einem Treppenhaus oder einer Eingangshalle, ist die Berechnung der Nachhallzeit aufgrund der Maße weniger zuverlässig. In solchen Räumen kann es für etwaige Anforderungen angemessen sein, eher das Ausmaß der Absorption als die Nachhallzeit festzulegen.

4.6 Einschränkungen

Das Rechenmodell der äquivalenten Absorptionsfläche ist laut Definition unabhängig vom Typ des Raumes, obwohl der Zusammenhang mit den resultierenden Schalldruckpegeln vom Typ und der Form des Raumes bestimmt wird.

Das Rechenmodell für die Nachhallzeit ist begrenzt auf Räume mit:

- regelmäßig ausgebildeten Volumina: keine Dimension sollte mehr als das 5fache jede andere Dimension betragen;
- gleichmäßig verteilter Absorption: der Absorptionsgrad sollte zwischen Paaren gegenüberliegender Oberflächen um nicht mehr als um einen Faktor 3 abweichen, außer wenn einige schallstreuende Objekte vorhanden sind;
- nicht zu vielen Objekten: der Objektanteil sollte kleiner als 0,2 sein.

Wenn diese Voraussetzungen nicht erfüllt sind, kann die tatsächliche Nachhallzeit häufig länger als die berechnete sein. Angaben dazu, wie in diesen Fällen die Nachhallzeit zu bestimmen ist, sind in Anhang D enthalten.

5 Genauigkeit

Die Genauigkeit des Vorhersagemodells wird von vielen Faktoren bestimmt: der Genauigkeit der Eingangsdaten, der Übereinstimmung zwischen der Bausituation und dem Modell, dem Typ der entsprechenden Materialien, Bauteile und Objekte, der Geometrie der Bausituation und der handwerklichen Ausführung. Es ist daher nicht möglich, die Genauigkeit der Vorhersagen für alle Bausituationen und Anwendungen festzulegen. Genauigkeitsangaben für zukünftige Anwendungen müssen durch Vergleich der Berechnungsergebnisse des Modells mit den Ergebnissen genauer Messungen in Gebäuden unter vielfältigen Bausituationen zusammengetragen werden. Begrenzte praktische Erfahrungen haben jedoch gezeigt, dass für Situationen mit einer geringen Diffusität (aufgrund von unregelmäßiger Raumform, unregelmäßiger Absorptionsverteilung, nur wenigen schallstreuenden Objekten oder geringer Modendichte), die tatsächliche Nachhallzeit bis zu zweimal so groß wie die vorhergesagte Nachhallzeit sein kann. Eine erhöhte Diffusität, beispielsweise aufgrund des Vorliegens mehr schallstreuender Objekte, verringert diese Differenz wesentlich.

Bei der Anwendung von Vorhersagen ist es ratsam, besonders in komplizierten Bausituationen und bei selten auftretenden Bauteilen mit unsicheren Eingangsdaten, diese Daten zu variieren. Die resultierende Variation der Ergebnisse liefert einen Eindruck der für diese Situationen zu erwartenden Genauigkeit.

Anhang A
(normativ)

Übersicht der verwendeten Symbole

Tabelle A.1 — Übersicht der Symbole

Symbol	Physikalische Größe	Einheit
A	Äquivalente Gesamt-Schallabsorptionsfläche in einem Raum	m^2
A_{obj}	Äquivalente Schallabsorptionsfläche eines Objekts	m^2
$A_{obj,j}$	Äquivalente Schallabsorptionsfläche des Objekts j	m^2
$A_{obj,k}$	Äquivalente Schallabsorptionsfläche der Objektanordnung k	m^2
$A_{obj,x}$, $A_{obj,y}$, $A_{obj,z}$, $A_{obj,central}$	Äquivalente Schallabsorptionsfläche von Objekten in der Nähe von Oberflächen bei jeweils $x = 0, x = L, y = 0, y = B, z = 0, z = H$ und in der Mitte des Raumes	m^2
$A_x = L$, $A_y = B$, $A_z = H$	Äquivalente Schallabsorptionsfläche der Oberfläche bei jeweils $x = L, y = B, z = H$ usw.	m^2
A_{air}	Äquivalente Fläche der Luftabsorption	m^2
A_x, A_y, A_z , A_d	Äquivalente Schallabsorptionsfläche für Schallfelder, die Oberflächen senkrecht zur x -, y - bzw. z -Achse sowie das diffuse Schallfeld streifen	m^2
A_s	Äquivalente Schallabsorptionsfläche von Oberflächen und Objekten im Teilraum s	m^2
A'_x, A'_y, A'_z , A'_d	Streuende Schallabsorptionsfläche für die Kopplung zwischen Schallfeldern von den streifenden Feldern x, y und z zu diffusen und von diffusen zu streifenden Feldern	m^2
A^*_x, A^*_y , A^*_z, A^*_d	Wirksame Schallabsorptionsfläche für Schallfelder, die Oberflächen senkrecht zur x -, y - und z -Achse sowie das diffuse Schallfeld streifen	m^2
A^*_{xyzd}	Wirksame Schallabsorptionsfläche in einem Raum unter f_t	m^2
C	Dimensionsloser Parameter des Absorptionsmaterials ($= \sigma/\rho_0 f$)	—
c_0	Schallgeschwindigkeit in Luft	m/s
d	Schichtdicke des Absorptionsmaterials	m
f	Frequenz	Hz
f_{ref}	Bezugsfrequenz (= 1 000 Hz)	Hz
f_t	Übergangsfrequenz	Hz

Tabelle A.1 (fortgesetzt)

Symbol	Physikalische Größe	Einheit
i	Index für absorbierende Oberflächen	—
j	Index für absorbierende Objekte, Index des Teilraums	—
k	Index der absorbierenden Objektanordnung, Index für Quellen, Index für Teilräume	—
k_0	Wellenzahl ($= 2\pi f/c_0$)	m^{-1}
$L_{p,s}$	Schalldruckpegel im Teilraum s	dB re 20 μ Pa
$L_{p,x}$	Schalldruckpegel für streifendes Schallfeld x ; ebenso mit Index y , z und d für streifendes Schallfeld y und z sowie diffuses Schallfeld	dB re 20 μ Pa
$L_{W,k}$	Schalleistungspegel der Quelle k	dB re 1 μ W
L, B, H	Länge, Breite und Höhe eines rechteckigen Raumes	m
l_{ref}	Bezugslänge ($= 1$ m)	m
m	Schalleistungs-Dämpfungskoeffizient in Luft	$(Np)m^{-1}$
N_x, N_y, N_z	Relative Anzahl von Wellentypen, die Oberflächen senkrecht zur x -, y - bzw. z -Achse streifen	—
n	Anzahl der absorbierenden Oberflächen, Anzahl der Teilräume k	—
o	Anzahl der absorbierenden Objekte	—
p	Anzahl der absorbierenden Objektanordnungen	—
p_0	Bezugsschalldruckpegel; $p_0 = 20 \mu$ Pa	Pa
r	Luftströmungswiderstand	Pa s/m ²
r_φ	Druck-Reflektionskoeffizient für eine ebene Schallwelle, auftreffend im Winkel φ	—
r_k	Abstand zwischen der Quelle k und dem Empfangspunkt in einem Teilraum	m
s	Anzahl von Teilräumen in einem Raum	—
S_i	Inhalt der Oberfläche i	m ²
S_k	Von einer Objektanordnung k bedeckte Oberfläche	m ²
$S_{s,j}$	Offene Fläche, die Teilraum s mit Teilraum j verbindet	m ²
T	Nachhallzeit	s
T_x, T_y, T_z, T_d	Nachhallzeit für Wellentypen in x -, y - und z -Richtung und diffuses Feld eines Raumes	s
T_{eff}	Wirksame Nachhallzeit im Raum, unter Berücksichtigung von Wellentypen in drei Richtungen	s
V	Volumen des leeren Raumes	m ³
V_s	Volumen des Teilraumes s	m ³
V_{obj}	Volumen eines Objektes oder einer Objektanordnung	m ³

Tabelle A.1 (fortgesetzt)

Symbol	Physikalische Größe	Einheit
$V_{\text{obj},j}$	Volumen des Objektes j	m^3
$V_{\text{obj},k}$	Volumen der Objektanordnung k	m^3
W_s	Schallleistung, die in den Teilraum s abgegeben wird	W
W_0	Bezugsschallleistung; $W_0 = 1$ Picowatt	W
w_s	Schallenergiedichte im Teilraum s	J/m^3
x, y, z	Abstand eines rechteckigen Raumes in drei Richtungen	m
Z'	$\rho_0 c_0$ -Norm-Oberflächenimpedanz	—
Z'_c	charakteristische $\rho_0 c_0$ -Norm-Impedanz des Absorptionsmaterials	—
α_s	Absorptionsgrad	—
$\alpha_{s,i}$	Absorptionsgrad der Oberfläche i	—
$\alpha_{s,k}$	Absorptionsgrad einer festgelegten Objektanordnung k	—
$\bar{\alpha}_s$	Mittlerer Absorptionsgrad eines Teilraumes s	—
α_φ	Absorptionsgrad für eine ebene Schallwelle, auftreffend im Winkel φ	—
γ	Ausbreitungskonstante im Absorptionsmaterial	m^{-1}
$\delta_x = 0$	Streukoeffizient der Oberfläche bei $x = 0$; ebenso mit Index für Oberflächen bei jeweils $x = L, y = 0, y = B, z = 0$ bzw. $z = H$.	—
φ	Einfallwinkel der ebenen Welle	rad
ρ_0	Dichte der Luft	kg/m^3
χ	Dämpfungsfaktor für verschiedene Dämpfungswirkungen bei direkter Schallausbreitung, beispielsweise Abschirmung und Strahlungsbündelung	—
ψ	Objektanteil	—

Anhang B (informativ)

Schallabsorption von Materialien

B.1 Beispiele

Nach EN ISO 354 gemessene Absorptionsgrade einiger üblicher Bauteiloberflächen sind in Tabelle B.1 angegeben. Die Werte können als typische Mindestwerte betrachtet werden.

Tabelle B.1 — Typische Werte für den Absorptionsgrad

Material	Schallabsorptionsgrad, α_s in Oktavbändern, Mittenfrequenz in Hz					
	125	250	500	1 000	2 000	4 000
Beton, verputztes Mauerwerk	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03
Mauerwerk, unverputzt	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,07
Harter Bodenbelag (z. B. PVC, Parkett) auf massiver Bodendecke	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05	0,06
Weicher Bodenbelag auf massiver Bodendecke; ≤ 5 mm	0,02	0,03	0,06	0,15	0,30	0,40
Weicher Bodenbelag auf massiver Bodendecke; ≥ 10 mm	0,04	0,08	0,15	0,30	0,45	0,55
Holzboden, Parkett auf Leisten	0,12	0,10	0,06	0,05	0,05	0,06
Fenster, Glasfassade	0,12	0,08	0,05	0,04	0,03	0,02
Türen (Holz)	0,14	0,10	0,08	0,08	0,08	0,08
Netz-Vorhang; 0 mm bis 200 mm vor einer harten Oberfläche ^a	0,05	0,04	0,03	0,02	0,02	0,02
Vorhang, $< 0,2$ kg/m ² ; 0 mm bis 200 mm vor einer harten Oberfläche; typischer Mindestwert ^a	0,05	0,06	0,09	0,12	0,18	0,22
Vorhang, Webstoff $\approx 0,4$ kg/m ² ; in Falten oder gerüsch, $> 1:3$, 0 mm bis 200 mm vor einer harten Oberfläche, typischer Höchstwert	0,10	0,40	0,70	0,90	0,95	1,00
Große Öffnungen (kleinstes Maß > 1 m)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Luftgitter, 50 % offene Fläche	0,30	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
ANMERKUNG Diese Angaben beruhen auf Veröffentlichungen, die in Österreich, Dänemark und den Niederlanden angewendet werden.						
^a Vor einem Fenster können die Werte der Kombination größer sein als die Werte für das Fenster allein.						

B.2 Berechnung

Der Schallabsorptionsgrad einer Schicht porösen Materials, das direkt auf einer harten Wand aufliegt, kann aus der Kenntnis des Strömungswiderstandes des Materials und der Schichtdicke berechnet werden. Der Strömungswiderstand wird nach EN 29053 [3] gemessen.

Für ein diffuses Schallfeld kann der Absorptionsgrad α_s bestimmt werden aus:

$$\alpha_s = \int_0^{\pi/2} \alpha_\varphi \sin 2\varphi d\varphi$$

$$\alpha_\varphi = 1 - |r_\varphi|^2 \tag{B.1}$$

$$r_\varphi = \frac{Z' \cos \varphi - 1}{Z' \cos \varphi + 1}$$

Dabei ist

φ der Einfallswinkel, in Radiant;

α_φ der Absorptionsgrad für eine ebene Schallwelle, mit dem Einfallswinkel φ ;

r_φ der Druck-Reflektionskoeffizient für eine ebene Schallwelle, einfallend im Winkel φ ;

Z' die $\rho_0 c_0$ -normierte(Wand-)Impedanz der Schicht.

Die Norm-Impedanz der Schicht für örtlich wirkendes Material, das direkt auf einer harten Wand aufliegt, kann bestimmt werden aus:

$$Z' = Z'_c \coth \gamma d \tag{B.2}$$

Dabei ist

γ die Ausbreitungskonstante im Absorptionsmaterial, in Radiant je Meter;

d die Dicke der Schicht, in Meter;

Z'_c die charakteristische $\rho_0 c_0$ -normierte Materialimpedanz des Absorptionsmaterials.

Für verschiedene Absorptionsmaterialien können die Norm-Materialimpedanz Z' und die Ausbreitungskonstante γ unter Anwendung der Parameter C und Wellenzahl k_0 durch empirische Beziehungen aus dem Strömungswiderstand r des Materials abgeleitet werden:

$$C = \frac{r}{\rho_0 f} \tag{B.3}$$

$$k_0 = \frac{2\pi f}{c_0}$$

Dabei ist

- r der längenbezogene Strömungswiderstand, in Pascalsekunden je Quadratmeter;
- f die Frequenz, in Hertz;
- ρ_o die Dichte der Luft ($\approx 1,2 \text{ kg/m}^3$), in Kilogramm je Kubikmeter;
- c_o die Schallgeschwindigkeit in Luft ($\approx 343 \text{ m/s}$), in Meter je Sekunde.

In den angegebenen Gleichungen wird die zeitliche Abhängigkeit von zeitlich veränderlichen Größen mit $e^{-i2\pi ft}$ angenommen.

Für Fasermaterialien lauten diese Beziehungen [1], [4]:

$$Z'_c = \left(1 + 0,0571 C^{0,754}\right) - i \left(0,087 C^{0,732}\right) \quad (\text{B.4a})$$

$$\gamma = k_o \left(0,189 C^{0,595}\right) + i k_o \left(1 + 0,0978 C^{0,700}\right)$$

Für offenzellige Schaumstoffe lauten diese Beziehungen [2]:

$$Z'_c = \left(1 + 0,114 C^{0,369}\right) - i \left(0,0985 C^{0,758}\right) \quad (\text{B.4b})$$

$$\gamma = k_o \left(0,168 C^{0,715}\right) + i k_o \left(1 + 0,136 C^{0,494}\right)$$

Jedes der genannten Verhältnisse besitzt seinen eigenen Gültigkeitsbereich für den Parameter C . Bei hohen Werten von C führen diese Verhältnisse zu physikalisch falschen Ergebnissen. Für solche Werte kann eine bessere Berechnung aus der folgenden Annahme erhalten werden [4]:

$$Z'_c = \sqrt{1,11 - i - 0,12C} \quad (\text{B.4c})$$

$$\gamma = i k_o 1,33 Z'_c$$

Für offenzellige Schaumstoffe und Fasermaterialien werden Ergebnisse für zusammenhängende Werte von C durch folgende Anwendung der Gleichungen erhalten:

- $C < 0,25$: Gleichungen B.4b
- $0,25 \leq C \leq 80$: Gleichungen B.4a
- $C > 80$: Gleichungen B.4c

Diese Arten der Vorhersage können auch auf mehrschichtige Absorptionsbauteile oder Absorptionsmaterialien mit einer dahinter liegenden Luftkammer angewendet werden; siehe Literaturhinweis [4].

Anhang C (informativ)

Schallabsorption durch Objekte

In den Tabellen C.1 und C.2 werden die nach EN ISO 354 gemessene äquivalente Absorptionsfläche und der nach der genannten Norm gemessene Schallabsorptionsgrad für einige übliche Objekte und Objektanordnungen angegeben. Diese Werte können als typische Werte angesehen werden.

Tabelle C.1 — Typische Werte der äquivalenten Absorptionsfläche für einige übliche Objekte

Objekt	Äquivalente Absorptionsfläche A_{obj} in Oktavbändern, Mittenfrequenz in Hz					
	125	250	500	1 000	2 000	4 000
Einfacher Stuhl, Holz	0,02	0,02	0,03	0,04	0,04	0,04
Einfacher Stuhl, gepolstert	0,10	0,20	0,25	0,30	0,35	0,35
Einzelne Person in einer Gruppe, sitzend oder stehend, 1 je 6 m ² Fläche; typischer Mindestwert	0,05	0,10	0,20	0,35	0,50	0,65
Einzelne Person in einer Gruppe, sitzend, 1 je 6 m ² Fläche; typischer Höchstwert	0,12	0,45	0,80	0,90	0,95	1,00
Einzelne Person in einer Gruppe, stehend, 1 je 6 m ² Fläche; typischer Höchstwert	0,12	0,45	0,80	1,20	1,30	1,40
ANMERKUNG Diese Angaben beruhen auf Veröffentlichungen, die in Österreich, Dänemark und in den Niederlanden angewendet werden.						

Tabelle C.2 — Typische Werte des Schallabsorptionsgrades für einige übliche festgelegte Objektanordnungen

Objektanordnung	Schallabsorptionsgrad α_s in Oktavbändern, Mittenfrequenz in Hz					
	125	250	500	1 000	2 000	4 000
Stühle in einer Reihe mit 0,9 m bis 1,2 m; Holz/Kunststoff	0,06	0,08	0,10	0,12	0,14	0,16
Stühle in einer Reihe mit 0,9 m bis 1,2 m; gepolstert; typischer Mindestwert	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,50
Stühle in einer Reihe mit 0,9 m bis 1,2 m; gepolstert; typischer Höchstwert	0,50	0,70	0,80	0,90	1,0	1,0
Personen, sitzend in einer Reihe mit 0,9 m bis 1,2 m (Zuhörer); typischer Mindestwert	0,20	0,40	0,50	0,60	0,70	0,70
Personen, sitzend in einer Reihe mit 0,9 m bis 1,2 m (Zuhörer); typischer Höchstwert	0,60	0,70	0,80	0,90	0,90	0,90
Kinder in einem hart möblierten Klassenzimmer, 1 je m ² Fläche	0,10	0,20	0,25	0,35	0,40	0,40
ANMERKUNG Diese Angaben beruhen auf Veröffentlichungen, die in Österreich, Dänemark und in den Niederlanden angewendet werden.						

Anhang D (informativ)

Berechnung für unregelmäßige Raumformen und/oder Absorptionsverteilungen

D.1 Einleitung

Wenn der Raum eine unregelmäßige Absorptionsverteilung oder unregelmäßige Formen aufweist oder in großem Umfang mit Maschinen und technischer Einrichtung bestückt ist, ist die Vorhersage zur Nachhallzeit entsprechend dem Rechenmodell in Abschnitt 4 möglicherweise entweder falsch oder irrelevant. In diesem Anhang werden Möglichkeiten aufgezeigt, Vorhersagen unter diesen Bedingungen zu verbessern. Die betrachteten wesentlichen Situationen sind (a) rechteckig und (b) unregelmäßig ausgebildete offene Räume mit unregelmäßiger Absorptionsverteilung und Räume, bedingt entweder durch die Bauweise oder durch weitgehendes Ausfüllen des leeren Raumes mit Objekten.

D.2 Unregelmäßige Absorptionsverteilung

Ein im Wesentlichen rechteckiger Raum mit unregelmäßiger Absorptionsverteilung ist häufig anzutreffen. In vielen Büros ist nur die Decke absorbierend ausgeführt, alle anderen Raumboflächen sind weitgehend reflektierend. Obwohl in der Literatur verschiedene Vorschläge für diesen Fall unterbreitet werden, scheint keiner davon allen Situationsarten gerecht zu werden.

Eine geeignete Lösung wäre, das Schallfeld so aufzuteilen, dass einige Teile die betrachtete Oberfläche streifen und ein Teile diese nicht streift [s]. Die unterschiedliche Wirkung von Absorptionsmaterialien auf diese verschiedenen Schallfelder und die Wirkung von schallstreuenden Elementen auf die Durchmischung der Schallfelder wird berücksichtigt durch die Betrachtung des Leistungsgleichgewicht zwischen den Schallfeldern. Dieser Anhang enthält eine praktische Berechnungsmethode, die auf diesem Modell beruht, jedoch die nach üblichen Prüfverfahren gemessene Absorptionsdaten verwendet.

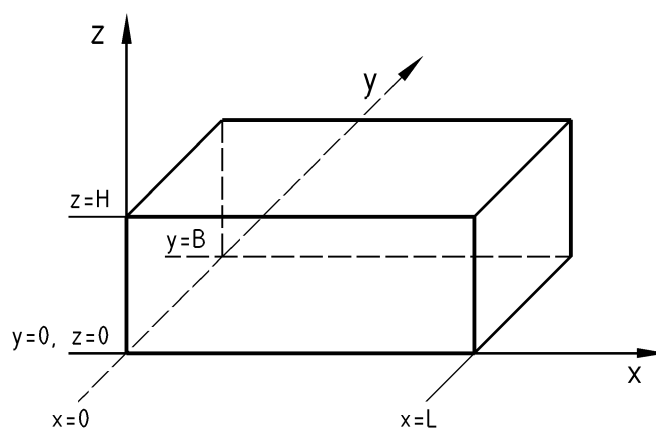


Bild D.1 — Festlegung der Maße eines rechteckigen Raumes

Die Raummaße entsprechen Bild D.1 für den Raum mit dem Volumen $V = L \cdot B \cdot H \text{ m}^3$. Für höhere gesamte Frequenzen wird das gesamte Schallfeld in drei Felder mit paralleler Schallausbreitung zu den Raumbegrenzungsflächen, senkrecht zu den x , y und z -Achsen, und ein diffuses Feld unterteilt. Für jedes dieser Felder werden die wirksame Absorption und die entsprechende Nachhallzeit bestimmt. Die Bedeutung jedes dieser Schallfelder wird durch die Modemzahl in diesen Feldern als Ableitung aus den Raummaßen bestimmt. Für die niedrigeren Frequenzen wird das Gesamtschallfeld mit einer auf Grund der fehlenden Streuung im Raum verringerten Absorptionswirkung bei diesen Frequenzen betrachtet.

Der Übergang zwischen hohen und niedrigen Frequenzen wird durch Vergleich der Oktavbandmittenfrequenz mit der Übergangsfrequenz nach folgender Gleichung bestimmt:

$$f_t = \frac{8,7c_0}{V^{1/3}} \quad (\text{D.1})$$

Die äquivalente Schallabsorptionsfläche A einer Raumboberfläche wird aus den Absorptionsdaten nach 4.3 abgeleitet, wobei nur die Raumbegrenzungsfläche selbst bei Vernachlässigung aller Objekte betrachtet wird. Die äquivalente Schallabsorptionsfläche der betreffenden Objekte A_{obj} wird ebenso von den Absorptionsdaten nach 4.3 abgeleitet. Die Absorption der Oberflächen des Raumes und die Absorption durch die verschiedenen Objekte wird, wie in diesem Anhang beschrieben, auf die betrachteten Schallfelder angewendet. Zusätzlich kann ein Streukoeffizient δ den Raumboberflächen zugeordnet werden, der den Anteil der reflektierten Energie angibt, der diffus reflektiert wird; dieser Wert kann im Bereich von 0,0 bis 1,0 liegen. Selbst wenn derzeit nur wenige Angaben zu diesem Koeffizienten zur Verfügung stehen, kann eine pauschale Schätzung angewendet werden, um einen Eindruck der Streuwirkung auf die Ergebnisse in besonderen Situationen zu erhalten.

ANMERKUNG 1 Der Streukoeffizient berücksichtigt Unregelmäßigkeiten in den ebenen Oberflächen. Für harte, ebene Oberflächen ist 0,05 oder weniger typisch; für strukturierte Oberflächen, wie z. B. in einer Fassade, kann dieser Wert bei mittleren und höheren Frequenzen typische Werte von 0,4 bis 0,6 annehmen.

Die relative Wellentypzahl nach Gleichung D.2 gibt den Beitrag jedes Schallfeldes an:

$$N_x = 0,14 + 1,43 \left[\frac{(B+H)}{2c_0} + \frac{\pi f}{c_0^2} BH \right] \frac{c_0^3}{4\pi f^2 V}$$

$$N_y = 0,14 + 1,43 \left[\frac{(L+H)}{2c_0} + \frac{\pi f}{c_0^2} LH \right] \frac{c_0^3}{4\pi f^2 V} \quad (\text{D.2})$$

$$N_z = 0,14 + 1,43 \left[\frac{(L+B)}{2c_0} + \frac{\pi f}{c_0^2} LB \right] \frac{c_0^3}{4\pi f^2 V}$$

Die äquivalente Schallabsorptionsfläche für die streifenden Schallfelder A_x , A_y und A_z und die äquivalente Schallabsorptionsfläche A_d für das diffuse Schallfeld, hervorgerufen durch Raumboberflächen und Luftabsorption, wird aus den Gleichungen D.3a bis D.3d bestimmt.

$$A_x = \frac{c_0^2}{2f^2 L^2} (A_{x=0} + A_{x=L}) (f/f_{\text{ref}})^{1/3} + [A_{y=0} + A_{y=B} + A_{z=0} + A_{z=H}] \sqrt{2} (f/f_{\text{ref}})^{1/3} + \pi m V \quad (\text{D.3a})$$

$$A_y = \frac{c_0^2}{2f^2 B^2} (A_{y=0} + A_{y=B}) (f/f_{\text{ref}})^{1/3} + [A_{x=0} + A_{x=L} + A_{z=0} + A_{z=H}] \sqrt{2} (f/f_{\text{ref}})^{1/3} + \pi m V \quad (\text{D.3b})$$

$$A_z = \frac{c_0^2}{2f^2 H^2} (A_{z=0} + A_{z=H}) (f/f_{\text{ref}})^{1/3} + [A_{x=0} + A_{x=L} + A_{y=0} + A_{y=B}] \sqrt{2} (f/f_{\text{ref}})^{1/3} + \pi m V \quad (\text{D.3c})$$

$$A_d = (A_{x=0} + A_{x=L} + A_{y=0} + A_{y=B} + A_{z=0} + A_{z=H}) + 4mV \quad (\text{D.3d})$$

Dabei sind

$A_{x=0}, A_{x=L}$ die äquivalenten Schallabsorptionsflächen der Oberflächen bei $x = 0$ bzw. $x = L$, in Quadratmeter;

ANMERKUNG 2 Die Indizes y und z bezeichnen die Größen, die zu den Oberflächen senkrecht zur y -Achse und zur z -Achse gehören.

f_{ref} die Bezugsfrequenz, in Hz; $f_{\text{ref}} = 1\,000$ Hz.

Die unterschiedlichen Schallfelder sind durch die Streuwirkungen der Oberflächen und die streuenden und absorbierenden Wirkungen der Objekte gekoppelt. Dies wird für die streuenden Schallabsorptionsflächen A'_x, A'_y, A'_z und A'_d für jedes Schallfeld angegeben und kann mit den Gleichungen D.4a bis D.4d bestimmt werden.

$$A'_x = \left[LH(\delta_y = 0 + \delta_y = B) + LB(\delta_z = 0 + \delta_z = H) \right] + A_{\text{obj},y} + A_{\text{obj},z} + A_{\text{obj},\text{central}} \quad (\text{D.4a})$$

$$A'_y = \left[BH(\delta_x = 0 + \delta_x = B) + LB(\delta_z = 0 + \delta_z = H) \right] + A_{\text{obj},x} + A_{\text{obj},z} + A_{\text{obj},\text{central}} \quad (\text{D.4b})$$

$$A'_z = \left[BH(\delta_x = 0 + \delta_x = B) + LH(\delta_y = 0 + \delta_y = H) \right] + A_{\text{obj},x} + A_{\text{obj},y} + A_{\text{obj},\text{central}} \quad (\text{D.4c})$$

$$A'_d = \sum_{\text{all}} A_{\text{obj}} + N_x A'_x + N_y A'_y + N_z A'_z \quad (\text{D.4d})$$

Dabei ist/sind

$\delta_x = 0, \delta_x = L$ die Streukoeffizienten der Oberflächen bei $x = 0$ bzw. $x = L$;

A_{obj} die äquivalente Schallabsorptionsfläche eines Objektes, in Quadratmeter;

$A_{\text{obj},x}$ die äquivalente Schallabsorptionsfläche der Objekte, die zu den Oberflächen bei $x = 0$ und $x = L$ gehören, in Quadratmeter;

$A_{\text{obj},\text{central}}$ die äquivalente Schallabsorptionsfläche dieser Objekte in Raummitte, in Quadratmeter.

ANMERKUNG 3 Die Indizes y und z geben die entsprechenden Größen an, die zur y - und z -Achse gehören.

Die wirksame Schallabsorptionsfläche für jedes Schallfeld kann mit den Gleichungen D.5a bis D.5b bestimmt werden.

$$A_d^* = \frac{A_d + A'_d - N_x A_x^2 / (A_x + A'_x) - N_y A_y^2 / (A_y + A'_y) - N_z A_z^2 / (A_z + A'_z)}{1 + N_x A'_x / (A_x + A'_x) + N_y A'_y / (A_y + A'_y) + N_z A'_z / (A_z + A'_z)} \quad (\text{D.5a})$$

$$A_x^* = \frac{A_x + A'_x}{1 + A'_x / A_d^*}; \quad A_y^* = \frac{A_y + A'_y}{1 + A'_y / A_d^*}; \quad A_z^* = \frac{A_z + A'_z}{1 + A'_z / A_d^*} \quad (\text{D.5b})$$

Die wirksame Schallabsorptionsfläche für das gesamte Feld A_{xyzd}^* bei niedrigen Frequenzen ($f < f_i$) kann mit Gleichung D.6a bestimmt werden,

$$A_{xyzd}^* = \left(\overline{A_{x=0}} + \overline{A_{x=L}} + \overline{A_{y=0}} + \overline{A_{y=B}} + \overline{A_{z=0}} + \overline{A_{z=H}} \right) + \sum A_{obj} + 4mV \quad (D.6a)$$

indem die äquivalenten Absorptionsflächen, bezeichnet mit \overline{A} , für jeden Index x , y und z um

$$\overline{A} = A e^{-A/S} \quad (D.6b)$$

verringert werden.

Dabei sind

A und S die äquivalente Schallabsorptionsfläche und der Inhalt der betrachteten Oberfläche.

Die Nachhallzeit für jedes Schallfeld x , y , z und d ist gegeben durch die Gleichungen D.7:

$$T_x = \frac{55,3}{c_0} \frac{V(1-\Psi)}{A_x^*}; T_y = \frac{55,3}{c_0} \frac{V(1-\Psi)}{A_y^*}; T_z = \frac{55,3}{c_0} \frac{V(1-\Psi)}{A_z^*}; T_d = \frac{55,3}{c_0} \frac{V(1-\Psi)}{A_d^*} \quad (D.7)$$

Der relative Schallpegel bei $t = 0$ s für jedes Schallfeld x , y , z und d kann bestimmt werden aus:

$$L_{p,d} = -10 \lg \left(1 + N_x \frac{A_d^*}{A_x^*} + N_y \frac{A_d^*}{A_y^*} + N_z \frac{A_d^*}{A_z^*} \right) \quad (D.8a)$$

$$L_{p,x} = L_{p,d} + 10 \lg \left(N_x \frac{A_d^*}{A_x^*} \right); L_{p,y} = L_{p,d} + 10 \lg \left(N_y \frac{A_d^*}{A_y^*} \right); L_{p,z} = L_{p,d} + 10 \lg \left(N_z \frac{A_d^*}{A_z^*} \right) \quad (D.8b)$$

Wenn die Unterschiede zwischen den vier Nachhallzeiten aus Gleichung D.7 gering sind, kann die Nachhallzeit des Diffusfeldes als angemessene Abschätzung der betrachteten Situation angesehen werden. Anderenfalls ist die Nachhallzeit wahrscheinlich länger, und die abfallende Kurve ist nicht mehr monoton. In dem Fall kann eine realistischere Abschätzung von T_{20} aus dem Mittelwert der wirksamen Nachhallzeiten aus Gleichung D.9a für den höheren Frequenzbereich berechnet werden. Diese Abschätzung der Nachhallzeit darf jedoch nicht kürzer als die des Diffusfeldes sein.

$$T_{estimate} = \frac{(T_x + T_y + T_z + T_d)}{4} \geq T_d \quad (D.9a)$$

Für die niedrigeren Frequenzen ($f < f_i$) ergibt sich die Abschätzung aus Gleichung D.9b:

$$T_{estimate} = \frac{55,3}{c_0} \frac{V(1-\Psi)}{A_{xyzd}^*} \quad (D.9b)$$

D.3 Unregelmäßig ausgebildete Räume

Bei sehr unregelmäßig ausgebildeten Räumen oder schmalen Räumen wird die Nachhallzeit, wie auch im Falle von vielen und/oder großen Objekten in einem regelmäßig ausgebildeten Raum, nicht über den gesamten Raum konstant sein. In Bausituationen mit einer großen Anzahl von Maschinen oder technischer Einrichtungsgegenstände ist jedoch nicht die Nachhallzeit von besonderer Bedeutung, sondern es sind vielmehr die Schalldruckpegel in den verschiedenen Teilen des Raums. Diese Schalldruckpegel werden sowohl von der Verteilung und der Schallleistung der Schallquellen als auch von der Verteilung der Absorption

bestimmt. In diesen Fällen kann eine Abschätzung der Schalldruckpegel auf einem Ansatz beruhen, bei dem der gesamte Raum in regelmäßige Teilräume unterteilt wird. Der Schalldruckpegel wird in jedem Teilraum durch den direkten Schall aus den Quellen in diesem Teilraum und den Anteil der Schalleistungsverteilung über alle Teilräume [6] geschätzt. Die Schalleistungsverteilung ergibt sich aus der durch die Schallquellen in jedem Teilraum in das Nachhallfeld abgegebenen Schalleistung, der äquivalenten Schallabsorptionsfläche jedes Teilraums und dem Schalleistungsgleichgewicht zwischen allen verbundenen Teilräumen.

ANMERKUNG Dieser Ansatz könnte für prEN 12354-5 [9] verwendet werden und wird entsprechend den weiteren Ausführungen entweder in zukünftigen Fassungen von Teil 6 oder in prEN 12354-5 [9] weiterentwickelt werden.

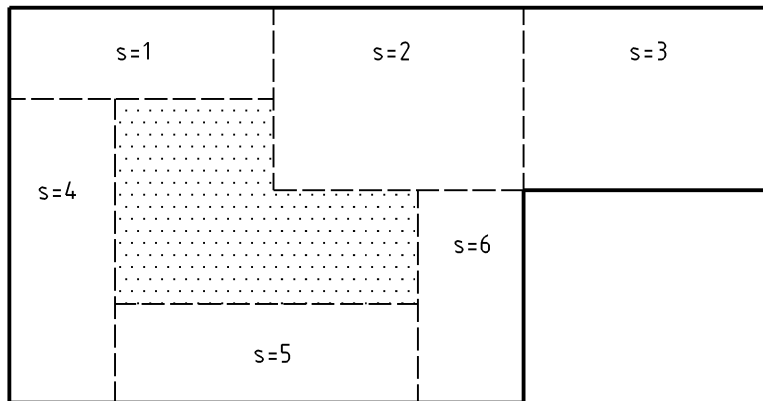


Bild D.2 — Abbildung eines unregelmäßig ausgebildeten Raumes und dessen Aufteilung in Teilräume $s = 1$ durch $s = 6$

Die äquivalente Schallabsorptionsfläche in jedem Teilraum mit dem Volumen V_s wird nach 4.3 unter der Annahme berechnet, dass für alle offenen Oberflächen S_{sj} zwischen dem betrachteten Teilraum s und den n verbundenen Teilräumen j $\alpha = 1$ ist. Das folgende Verhältnis gilt für jeden Teilraum s , in dem sich k Schallquellen mit dem Schalleistungspegel $L_{w,k}$ befinden:

$$W_s = c_0 w_s A_s - \sum_{j \neq s}^n c_0 w_j S_{sj} \tag{D.10a}$$

mit

$$W_s = (1 - \overline{\alpha_s}) W_0 \sum_k 10^{L_{w,k}/10} \tag{D.10b}$$

Dabei ist

- W_s die durch Schallquellen im Teilraum s in das Nachhallfeld abgegebene Schalleistung, in Watt;
- W_0 die Bezugsschalleistung in Watt, $W_0 = 1$ Picowatt;
- w_s die Schallenergiedichte im Teilraum s , in Joule je Kubikmeter;
- A_s die äquivalente Schallabsorptionsfläche der Oberflächen, Öffnungen, Objekte und Luft im Teilraum s , in Quadratmeter;
- $S_{s,j}$ die offene Verbindungsfläche zwischen dem Teilraum s und dem Teilraum j , in Quadratmeter;
- n die Anzahl der Teilräume k , die mit Teilraum s verbunden sind;
- $L_{w,k}$ der Schalleistungspegel der Quelle k im Teilraum s , in dB re 1 Picowatt;
- $\overline{\alpha_s}$ der mittlere Absorptionsgrad für den Teilraum s , unter Berücksichtigung der gesamten Absorption (d. h. Oberflächen, Öffnungen, Objekte, Luft).

Die Schallenergiedichte w_s in jedem Teilraum ergibt sich durch Lösen der Gleichung D.10a bei gegebenen Schalleistungspegeln und gegebener Absorption, z. B. durch Matrixinversion. Der Schalldruckpegel, $L_{p,s}$, in jedem Teilraum ergibt sich so aus der Berücksichtigung der direkten Schallübertragung durch im Abstand r_k vom Empfangspunkt gelegenen Quellen k zum Empfangspunkt und der entsprechenden Schalldämpfungsfaktoren, die sich aus Wirkungen wie Abschirmung und Strahlungs Bündelung ergeben:

$$L_{p,s} = 10 \lg \frac{\rho_o c_o}{p_o^2} \left[4 c_o w_s + \sum_k \frac{W_o}{4 \pi r_k^2} \chi_k \cdot 10^{L_{w,k} / 10} \right] \quad (D.11)$$

Dabei ist

- $L_{p,s}$ der Schalldruckpegel im Teilraum s , in dB re 20 μ Pa;
- p_o der Bezugsschalldruck, in Pascal; $p_o = 20 \mu$ Pa;
- r_k der Abstand zwischen der Quelle k und dem Empfangspunkt im Teilraum k , in Meter;
- χ_k ein Schalldämpfungsfaktor, der verschiedene während der Schallausbreitung stattfindende Dämpfungswirkungen beschreibt, wie beispielsweise Abschirmung und Bündelung der Strahlung von der Quelle k zum Empfangspunkt.

Anhang E (informativ)

Rechenbeispiel

Ein Raum hat die Maße (Länge, Breite, Höhe) von $4,54 \times 2,73 \times 2,40 = 29,75 \text{ m}^3$.

Die Bodendecke und die Decke sind aus Beton, eine Wand (lange Wand) und die beiden Seitenwände (kurze Wände) sind aus unverputztem Mauerwerk, und die verbleibende Oberfläche ist als Glasfassade ausgeführt. Die Bodendecke verfügt über einen harten Belag. Betrachtet wird das Oktavband mit 1 000 Hz.

Fall 1: leerer Raum

In Übereinstimmung mit Anhang B betragen die Absorptionsgrade für die Oberflächen $\alpha_{\text{Fußboden}} = 0,05$, $\alpha_{\text{Decke}} = 0,02$, $\alpha_{\text{Wand}} = 0,04$, $\alpha_{\text{Seitenwand}} = 0,04$ und $\alpha_{\text{Fassade}} = 0,04$. Beim Betrachten des 1 000-Hz-Oktavbandes und des Volumens kann die Luftabsorption vernachlässigt werden ($A_{\text{air}} = 0 \text{ m}^2$). Mit diesen Angaben führt Gleichung (1) zu einer äquivalenten Absorptionsfläche von $A = 12,39 \times 0,05 + 12,39 \times 0,02 + 10,90 \times 0,04 + 10,90 \times 0,04 + 6,55 \times 0,04 + 6,55 \times 0,04 = 2,26 \text{ m}^2$,

gerundet auf $A = 2,3 \text{ m}^2$. Aus Gleichung (5) ergibt sich eine Nachhallzeit $T = 0,16 \cdot \frac{29,75}{2,26} = 2,1 \text{ s}$.

ANMERKUNG In diesem Fall ist unter üblichen Bedingungen $A_{\text{Luft}} = 0,12 \text{ m}^2$, so dass sich eine Nachhallzeit von 2,0 s ergeben würde.

Fall 2: Fall 1 mit (harten) Objekten

Werden ein Tisch ($0,15 \text{ m}^3$), ein Schreibtisch ($0,60 \text{ m}^3$), zwei Stühle ($2 \times 0,05 \text{ m}^3$) und zwei Schränke ($2 \times 0,65 \text{ m}^3$) in den Raum gebracht, beträgt der Volumenanteil $\psi = 0,072$, während die Absorption durch diese harten Objekte mit $\Sigma A_{\text{obj}} = 0,15^{2/3} + 0,60^{2/3} + 2 \times 0,05^{2/3} + 2 \times 0,65^{2/3} = 2,77 \text{ m}^2$ geschätzt wird.

Folglich beträgt die äquivalente Absorptionsfläche $A = 2,26 + 2,77 = 5,03 \text{ m}^2$, gerundet auf $A = 5,0 \text{ m}^2$, und die Nachhallzeit folgt mit

$$T = \frac{0,16 \cdot 29,75 (1 - 0,072)}{5,03} = 0,9 \text{ s}$$

Fall 3: Fall 1 mit einer absorbierenden Wand

Eine lange Wand wird zu 90 % ihrer Oberfläche mit einem Absorptionsmaterial verkleidet, dessen Absorptionsgrad $\alpha_s = 0,85$ beträgt. Folglich beträgt die äquivalente Absorption

$$A = 12,39 \times 0,05 + 12,39 \times 0,02 + (1,09 \times 0,04 + 9,81 \times 0,85) + 10,90 \times 0,04 + 6,55 \times 0,04 + 6,55 \times 0,04 = 10,21 \text{ m}^2, \text{ gerundet auf } A = 10,2 \text{ m}^2.$$

Nach Gleichung (5) ergibt sich eine Nachhallzeit $T = \frac{0,16 \cdot 29,75}{10,21} = 0,5 \text{ s}$.

Da zwei einander gegenüberliegende Wände sich hinsichtlich der Absorption beträchtlich unterscheiden und da keine schallstreuenden Objekte vorliegen, liegt dieser Fall tatsächlich außerhalb der Anwendungsgrenzen des Modells. Eine Angabe der Nachhallzeit könnte in dieser Situation aus Anhang D abgeleitet werden. Entsprechend D.2 würden die Nachhallzeiten für die vier Schallfelder in diesem Fall, ohne zusätzliche Streuung durch Oberflächen oder Objekte, (Gleichung D.3) $A^*_x = 13,69 \text{ m}^2$; $A^*_y = 2,04 \text{ m}^2$; $A^*_z = 13,22 \text{ m}^2$ und $A^*_d = 10,21 \text{ m}^2$ betragen. Die entsprechenden Nachhallzeiten (z. B. Gleichung D.6) sind $T_x = 0,35 \text{ s}$; $T_y = 2,34 \text{ s}$; $T_z = 0,36 \text{ s}$ und $T_d = 0,47 \text{ s}$, die zu einer wirksamen Nachhallzeit $T_{\text{eff}} = 0,9 \text{ s}$ (Gleichung D.8) führen. Da T_y etwa fünfmal länger als die kürzeste Zeit ist, handelt es sich wahrscheinlich in diesem Fall um eine bessere Abschätzung der tatsächlichen Nachhallzeit (T_{20}).

Literaturhinweise

- [1] Delany, M.E. & E.N. Bazley, Acoustical properties of fibrous absorbent materials, *Applied Acoustics* **3** (1970), 105.
- [2] Dunn, I.P. & W.A. Davern, Calculation of acoustic impedance of multi-layer absorbers, *Applied Acoustics* **19** (1986), 321.
- [3] EN 29053, *Akustik — Materialien für akustische Anwendungen — Bestimmung des Strömungswiderstandes (ISO 9053:1991)*.
- [4] Mechel, F.P. *Schallabsorber Band II*, S.Hirzel Verlag, Stuttgart, Leipzig, 1995
- [5] Nilsson, E., Decay process in rooms with non-diffuse sound fields, Report TVBA-1004, Lund Institute of Technology, May 1992.
- [6] Timmermans, N.S., Application of coupled interior space noise prediction to compact shipboard power plants, *Internoise '80*, Miami 1980.
- [7] EN ISO 11654, *Akustik — Schallabsorber für die Anwendung in Gebäuden — Bewertung der Schallabsorption (ISO 11654:1997)*.
- [8] EN ISO 140-4, *Akustik — Messung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen — Teil 4: Messung der Luftschalldämmung zwischen Räumen in Gebäuden (ISO 140-4:1998)*.
- [9] prEN 12354-5, *Bauakustik — Berechnung der akustischen Eigenschaften von Gebäuden aus den Bauteileigenschaften — Geräusche von haustechnischen Anlagen und Geräten*.
- [10] prEN ISO 3382-2, *Bauakustik — Messung der Nachhallzeit — Teil 2: Normale Räume*.