

Raumakustische Grundlagen.

Die Raumakustik eines „leeren“ Raumes unterliegt vielfältigen Einflüssen wie Material und Struktur der umgebenden „Wände“ und wird durch die Nachhallzeit des Raums charakterisiert. Sie ist damit die akustische „Visitenkarte“ des Raumes.

Die Nachhallzeit - die Zeitspanne, in der ein Schalldruckpegel nach Abschalten der Schallquelle in einem Raum um 60 Dezibel abfällt - hängt im Wesentlichen von drei Faktoren ab:

- von dem Raumvolumen
- von den Oberflächen der „Wände“
- von den sich im Raum befindlichen Einrichtungsgegenständen.

Ist die Nachhallzeit zu lang, der Raum zu hallig, der Schalldruckpegel zu laut kann durch „Sekundärmassnahmen“ die Raumakustik verbessert werden.

Grundsätzlich gilt:

- Sehr große „leere“ Räume z.B. Kirchen, Konzertsäle, ... besitzen lange Nachhallzeiten bis zu 8 Sekunden.
- Große „leere“ Räume z.B. Seminarräume, Klassenzimmer, Büro, Wohnzimmer ... besitzen mittlere Nachhallzeiten bis zu 4 Sekunden
- Kleine „leere“ Räume z.B. PKW Innenraum, Waschmaschine, Lautsprecherbox ... besitzen kurze und sehr kurze Nachhallzeiten bis zu 2,5 Sekunden und zum Teil deutlich unter 1 Sekunde.
- Mehr Schallabsorption, Schallabsorptionsfläche im Raum verkürzt die Nachhallzeit. Jedoch ist eine freifeldähnliche Akustik im Raum erreicht bringt eine weitere Erhöhung der Absorptionsfläche keine akustische Verbesserung.

Voraussetzung für eine gute Sprachverständlichkeit ist die richtige, optimale Nachhallzeit im Raum.

Grundlage für Empfehlungen und Hinweise zur raumakustischen Planung bildet die DIN 18041 "Hörsamkeit in kleinen bis mittelgroßen Räumen" (überarbeitete Fassung 2016). Sie gibt bestimmte technische Normen und Richtlinien vor und unterscheidet Räume der Gruppen A und B. [Oder es gelten OEM-Spezifikationen der Automobilhersteller](#)

**Räume der Gruppe A
mit Schwerpunkt auf gute "Hörsamkeit über mittlere und
größere Entfernungen"**

Musik	Musikunterrichtsraum mit aktivem Musizieren und Gesang, Rats- und Festsaal für Musikdarbietungen
--------------	--

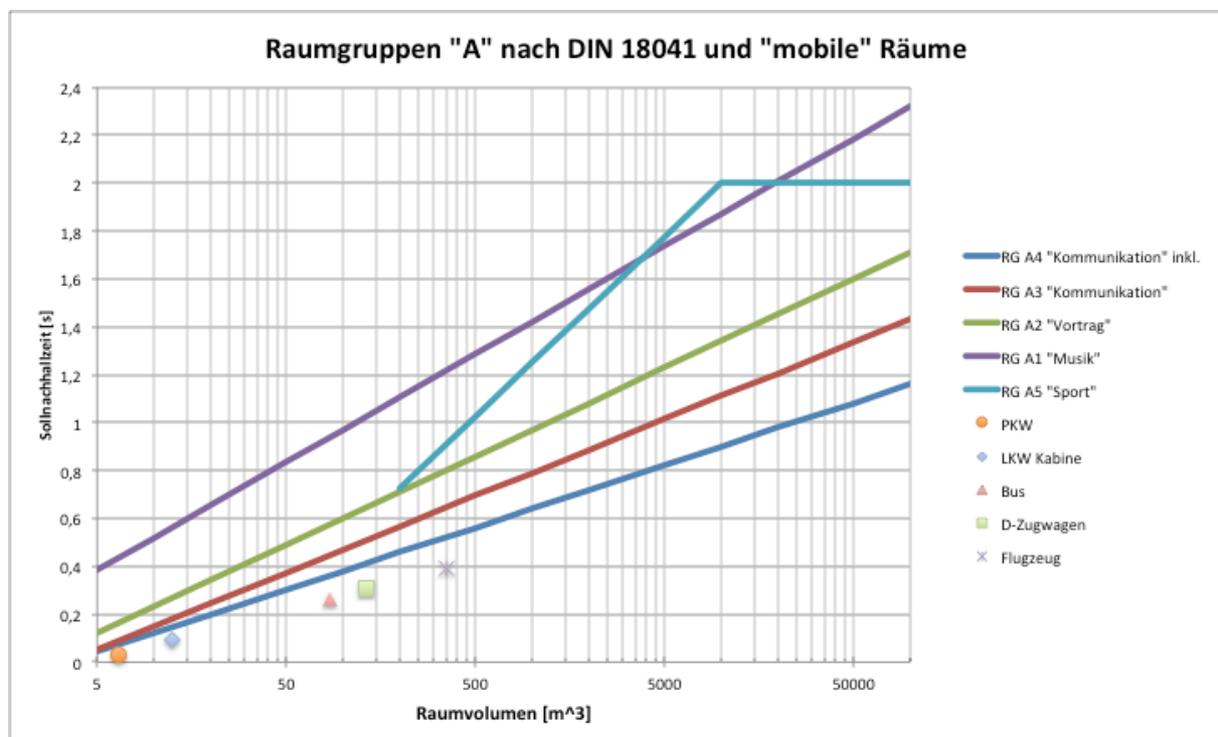
Sprache	Gerichts- und Ratssaal, Gemeindesaal, Versammlungsraum, Musikprobenraum in Musikschulen, Sport- und Schwimmhallen mit Publikum
Unterricht, Meeting	Unterrichtsraum, Hörsaal, Musikunterrichtsraum mit audio-visueller Darbietung, Gruppenräume in Kindergärten, Seniorentagesstätten, Seminarraum

Die DIN 18041 unterscheidet im Hinblick auf die optimale Nachhallzeit oder auch bewertete Nachhallzeit „aw“ nach ISO 11654 bei 500 Hz in einem Raum in Abhängigkeit von dessen Nutzung und Volumen zwischen drei Kategorien

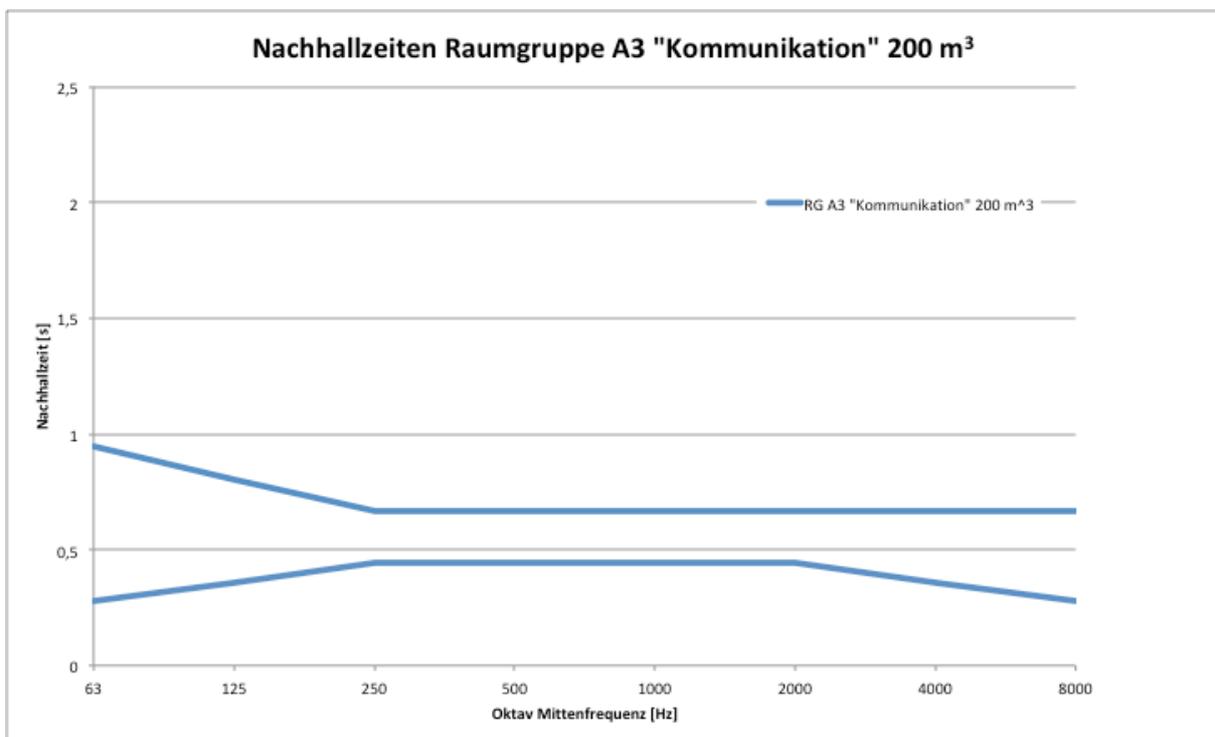
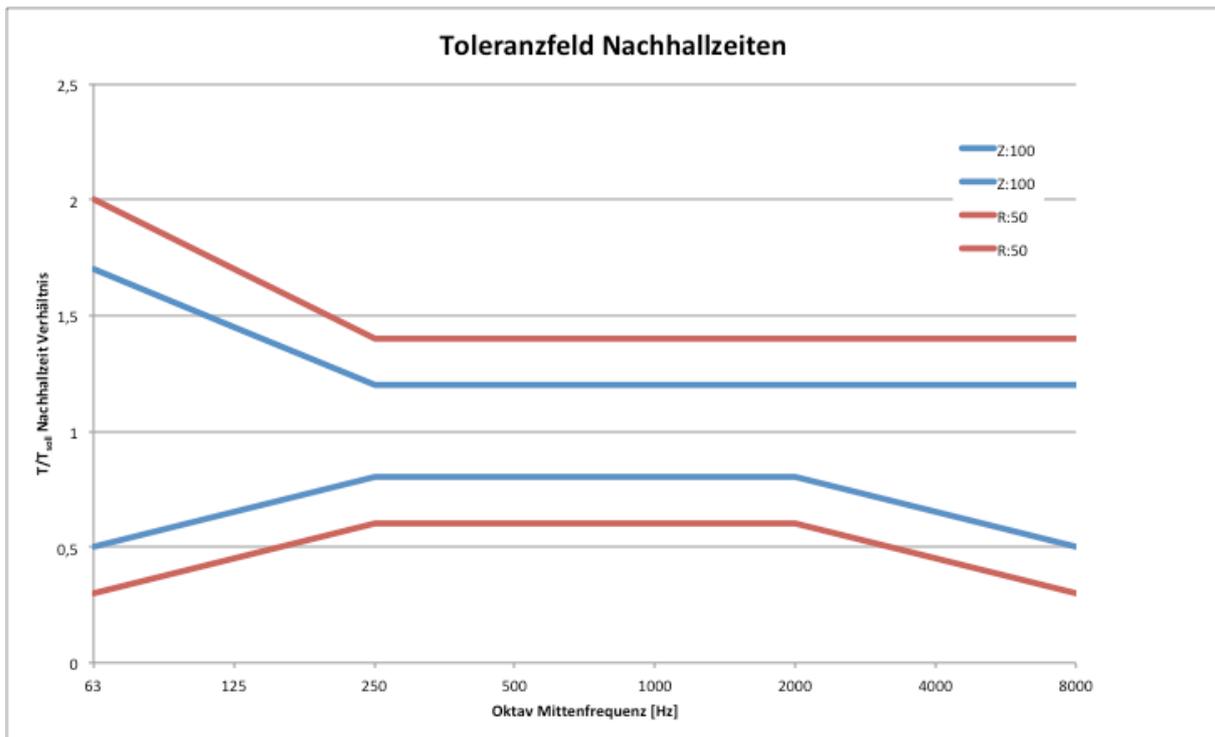
- A1: Musik;
- A2: Sprache, Vortrag;
- A3: Unterricht, Kommunikation;
- A4: Unterricht, Kommunikation inklusiv Beschallungsanlage
- A5: Sport;

und formuliert für jeden Raumtyp Soll-Nachhallzeiten.

RG A1 Musik:	$T_{\text{soll}} = 0,45 \cdot \lg(V) + 0,07 \text{ [s]}$
RG A2 Vortrag:	$T_{\text{soll}} = 0,37 \cdot \lg(V) - 0,14 \text{ [s]}$
RG A3 Kommunikation:	$T_{\text{soll}} = 0,32 \cdot \lg(V) - 0,17 \text{ [s]}$
RG A4 Komm. Inkl.	$T_{\text{soll}} = 0,26 \cdot \lg(V) - 0,14 \text{ [s]}$
RG A5 Sport	$T_{\text{soll}} = 0,75 \cdot \lg(V) - 1 \text{ [s]} \leq 10000 \text{ m}^3$ $T_{\text{soll}} = 2 \text{ [s]} > 10000 \text{ m}^3 \text{ Raumvolumen}$



Das Toleranzfeld dieser Soll-Nachhallzeiten:



PKW Sollnachhallzeiten (VW-Golf-Klasse Volumen ca. 6,5 m³)

500 Hz $\leq 0,051$ s

1000 Hz $\leq 0,05$ s

2000 Hz $\leq 0,049$ s

4000 Hz $\leq 0,048$ s

8000 Hz $\leq 0,047$ s

Räume der Gruppe B mit Schwerpunkt auf gute "Hörsamkeit über geringere Entfernungen"

Alt: Für Raumhöhe kleiner oder gleich 2,5 m gilt: *Erforderliche vollständige Absorptionsgrade (Schallabsorptionsgrad 1 über einen weiten Frequenzbereich) auf einem Vielfachen der Raumgrundfläche

Neu: Das Verhältnis von notwendiger, hochwertiger Absorptionsfläche – Absorptionsgrad ~ 1 – zu Raumvolumen $A/V = 0,3$ für RG B5 ... $0,15$ für RG B2

Raumgruppe B5: Verkaufsräume, Werkräume, Call-Center, Lesesäle in Bibliotheken
alt: $0,9 \cdot \text{Raumgrundfläche}$,
oder neuer: Raumgruppe B5 mit Absorptionsfläche $\geq 0,3 \cdot \text{Raumvolumen}$

Raumgruppe B4: Mehrpersonen- oder Großraumbüros mit Büromaschinen, Schalterhallen, Bürgerbüros, Operationssäle, Krankenzimmer, Leihstellen in Bibliotheken, Ausleihbibliotheken
alt: $0,7 \cdot \text{Raumgrundfläche}$
oder neuer: Raumgruppe B4 mit Absorptionsfläche $\geq 0,25 \cdot \text{Raumvolumen}$

Raumgruppe B3: Einzelbüros, Sprechzimmer, Behandlungs- und Rehabilitationsräume, Pausenhallen, Speisegaststätten, Speiseräume, Kantinen mit einer Fläche über 50 m^2
alt: $0,5 \cdot \text{Raumgrundfläche}$
oder neuer: Raumgruppe B3 mit Absorptionsfläche $\geq 0,2 \cdot \text{Raumvolumen}$

Raumgruppe B2: Treppenhäuser, Foyers, Ausstellungsräume, Verkehrsflächen (Flure und Vorräume) mit starkem Personenverkehr und Publikumsbereich für den ÖPNV
alt: $0,2 \cdot \text{Raumgrundfläche}$
oder neuer: Raumgruppe B2 mit Absorptionsfläche $\geq 0,15 \cdot \text{Raumvolumen}$

PKW untere Mittelklasse „optimiert“: Absorptionsfläche $\geq 1 \cdot \text{Raumvolumen}$
(Gute Akustik im Fahrgastraum)

PKW untere Mittelklasse „Cabrio“: Absorptionsfläche $\geq 0,5 \cdot \text{Raumvolumen}$
(Sitze, Bodenauskleidung, Dachauskleidung, Türtafeln schallhart: schlechte Akustik im Fahrgastraum bei um 5 bis 6 dB erhöhten Schalldruckpegel)

Wichtiges Kriterium der Sprachverständlichkeit in Kraftfahrzeugen ist der Artikulationsindex berechnet aus Schalldruckpegeln.

Die Schallabsorption

Der Schallabsorptionsgrad α beschreibt die Eigenschaft eines Materials, auftreffenden Schall in Wärmeenergie umzuwandeln und somit zu absorbieren. Die meisten Materialien haben einen Schallabsorptionsgrad zwischen 0 und 1! Der Schallabsorptionsgrad α ist in hohem Maße von der Frequenz abhängig. Deshalb muss auch die Wirkung von Schallabsorbern frequenzabhängig betrachtet werden.



Wellenreflektion, Absorptionsgrad 0



Wellenabsorption, Absorptionsgrad 1

Der Schallabsorptionsgrad

Der Schallabsorptionsgrad α ist von der Frequenz abhängig. Die Wirkung von Schallabsorbern muss daher frequenzabhängig betrachtet werden. Allgemein gilt: Hohe Frequenzen benötigen in der Regel durch Schallabsorber mit geringer Aufbauhöhe, tiefe Frequenzen dagegen Schallabsorber mit größerer Aufbauhöhe.

Faustregel: Aufbauhöhe entspricht etwa $\frac{1}{4}$ der Wellenlänge die absorbiert werden soll.

100 Hz ca. 858 mm

3150 Hz ca. 27,2 mm

10.000 Hz ca. 8,58 mm

Der Schallabsorptionsgrad α im diffusen Schallfeld wird durch eine schalltechnische Materialprüfung - das sogenannte Hallraumverfahren ISO 354 - ermittelt. Da für die schallabsorbierende Wirkung nicht nur die Auswahl des Materials von Bedeutung ist, sondern auch seine Fläche im Raum wird für die akustische Wirkung die äquivalente Schallabsorptionsfläche im Raum als Produkt aus dem Schallabsorptionsgrad α und Absorberfläche S wie folgt berechnet:

$$A = \sum \alpha_i \cdot S_i$$

mit:

A = gesamte äquivalente Schallabsorptionsfläche im Raum

S_1 = Flächengröße von Material 1, (z.B. Glas)

α_1 = Schallabsorptionsgrad von Material 1

S_2 = Flächengröße von Material 2, (z.B. Beton)

α_2 = Schallabsorptionsgrad von Material 2

S_n = Flächengröße von Material n, (z.B. Teppichbelag)

α_n = Schallabsorptionsgrad von Material n

Material	Schallabsorptionsgrad α bei Oktavband-Mittelfrequenzen in Hz					
	125	250	500	1000	2000	4000
Sichtbeton	0,01	0,01	0,01	0,02	0,03	0,03
Fenster, geschlossen	0,10	0,15	0,10	0,05	0,03	0,02
Parkett, versiegelt, ohne Hohlraum	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05
Stuckgips	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05
Akustik Kasette 1 mm Lochbl. 30% offen vor 160 mm Glasvlies	0,60	0,85	0,95	0,95	0,95	0,90
Teppichbelag, 7mm	0,02	0,05	0,10	0,30	0,50	0,60
Melaminschaum 50 mm	0,20	0,60	0,90	0,98	0,93	0,96
Akustikputz 12mm, direkt auf der Decke	0,04	0,15	0,26	0,41	0,69	0,84
Gipskartonplatte 9,5mm, Abstand 50mm, leer	0,32	0,07	0,05	0,04	0,05	0,08

Schallabsorberklassen nach DIN EN ISO 11654

Praktischer Absorptionsgrad α_p nach ISO 11654

- Ermittlung aus gemessenen Terz-Absorptionsgraden als arithmetische Mittelung des Absorptionsgrades aus den drei zur Oktave gehörenden Terzen
- Werte auf 2 Dezimale begrenzen und auf Runden auf 0,05
- Maximaler Absorptionsgrad α_p ist auf 1 begrenzt

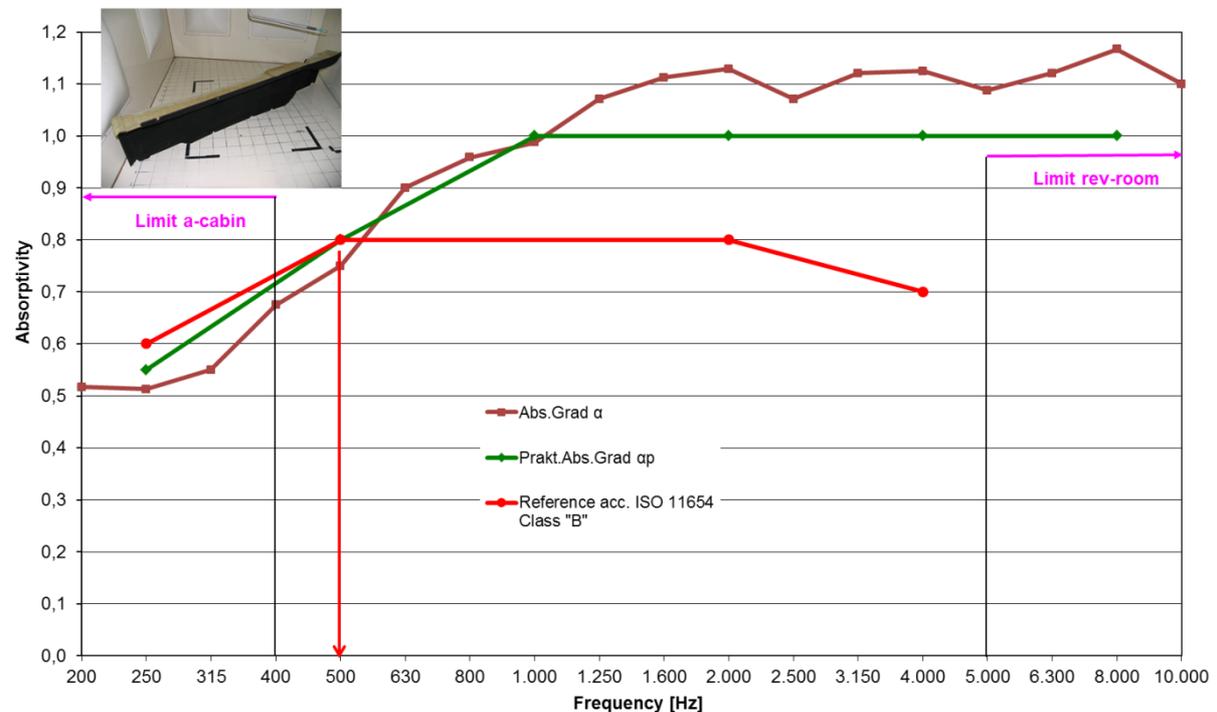
Bewerteter Absorptionsgrad nach ISO 11654

Anwendung des Bezugskurvenverfahrens

- Verschieben der Bezugskurve in Richtung der Messwerte in Schritten von 0,05
- Maximale Summe der ungünstigen Abweichungen $\leq 0,1$
- Der Wert der verschobene Bezugskurve bei 500 Hz ist α_w

Beispiel: $\alpha_w = 0,8 \Rightarrow$ Schallabsorptionsklasse „B“

BORGERS JB- α -cabin airborne noise absorption acc. ISO 354 EN ISO 11654	VOLVO Truck		Report: 01402 14.08.2008
	"Bonnet" left 70 mm		Engineer: J. Borgers TAK
	Alpha Cabin		Page: 1



Klassifizierung α_w nach ISO 11654

Schallabsorptionsklasse	α_w -Werte
A	0,90; 0,95; 1,00
B	0,80; 0,85
C	0,60; 0,65; 0,70; 0,75
D	0,30; 0,35; 0,40; 0,45; 0,50; 0,55
E	0,15; 0,20; 0,25
Nicht Klassifiziert	0,00; 0,05; 0,10

Sabine'sche Formel der Nachhallzeit

Der Physiker Wallace Clement Sabine (1868-1919) fand experimentell die grundlegende Beziehung zwischen dem Volumen eines Raumes und seiner äquivalenten Absorptionsfläche aufgrund seiner vorhandenen, charakteristischen Oberflächen und der Nachhallzeit heraus. Die Nachhallzeit T verhält sich proportional zum Raumvolumen V des Raumes und umgekehrt proportional zur seiner äquivalenten Absorptionsfläche A . Die Berechnung der Nachhallzeit erfolgt nach:

$$T = 0,163 \cdot V/A$$

T = Nachhallzeit

V = Raumvolumen

A = gesamte äquivalente Schallabsorptionsfläche

Anmerkung: Eventuell notwendige Korrekturen wie Änderung der Schallgeschwindigkeit über der Lufttemperatur sowie Änderung der relativen Luftfeuchte während der Messung bleiben unberücksichtigt

Die Materialauswahl für die Luftschallabsorptionssysteme

Aus der obigen mathematischen Erkenntnis lässt sich die Wirkung von Schallabsorbieren ableiten: Je höher der Schallabsorptionsgrad eines Materials und dessen Fläche im Raum, desto kürzer ist die Nachhallzeit im Raum. Maßgebend für die schallabsorbierende Wirkung ist eine bestimmte Fläche im Raum. Es kann sowohl ein Schallabsorber allein als auch eine Kombination verschiedener Schallabsorber verwendet werden. Entscheidend für die Nachhallzeit im Raum ist grundsätzlich die gesamte äquivalente Schallabsorptionsfläche.

Grundsätzlich werden die Luftschallabsorbierenden Eigenschaften eines porösen Materials durch seine BIOT-Parameter bestimmt:

- Materialdicke [m]
- Längenbezogener Strömungswiderstand (Resistivity) [$\text{Pa} \cdot \text{s}/\text{m}/\text{m}$]
- Porosität (Porosity) Verhältnis von Luftvolumen zu Festkörpervolumen
- Kapillarenkrümmung (Tortuosity)
- Viscous Length (Durchmesser eines kleinen Loches zwischen 2 Schaumblasen) [μm]
- Thermal Length (Durchmesser einer Schaumblase) [μm]

Der spezifische Strömungswiderstand – ISO 9053 – als Produkt aus den Materialkennwerten Längenbezogener Strömungswiderstand und Materialdicke – eines guten Luftschallabsorptionsmaterials sollte bei der zweifachen Kennimpedanz (Produkt aus Schallgeschwindigkeit und Dichte der Luft ca. $820 \text{ Pa} \cdot \text{s}/\text{m}$) der Luft liegen.

In der Praxis haben sich folgende Werte

Faservliese: $600 \dots 1800 \text{ Pa} \cdot \text{s}/\text{m}$

PUR-Schaumsysteme: $1200 \dots 3600 \text{ Pa} \cdot \text{s}/\text{m}$
bewährt.

Mit Hilfe von mathematischen Simulationsprogrammen wie NORFLAG lassen sich unter Verwendung bekannter BIOT-Parameter nahezu beliebige mehrschichtige Luftschallabsorber „konstruieren“. Nachweise der Wirksamkeit der Absorber über Impedanzrohr ISO 10534 und/oder Hallraum ISO 354 bleiben aber unverzichtbar.

Literaturverzeichnis

DIN 18041 Hörsamkeit in kleinen bis mittelgroßen Räumen

EN ISO 11654 Akustik-Schallabsorber für die Anwendung in Gebäuden Bewertung der Schallabsorption

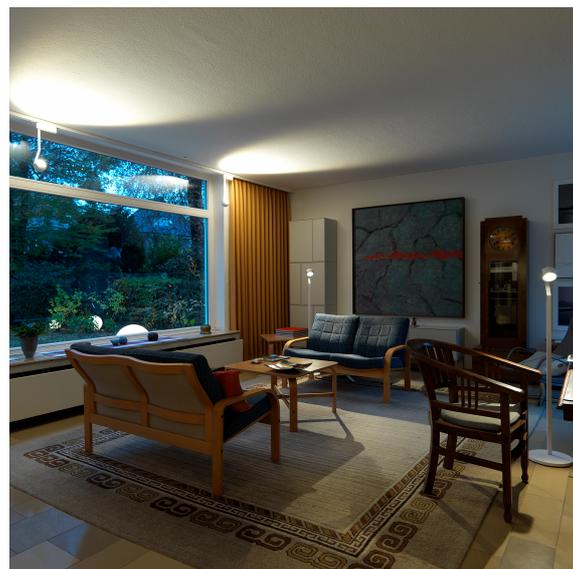
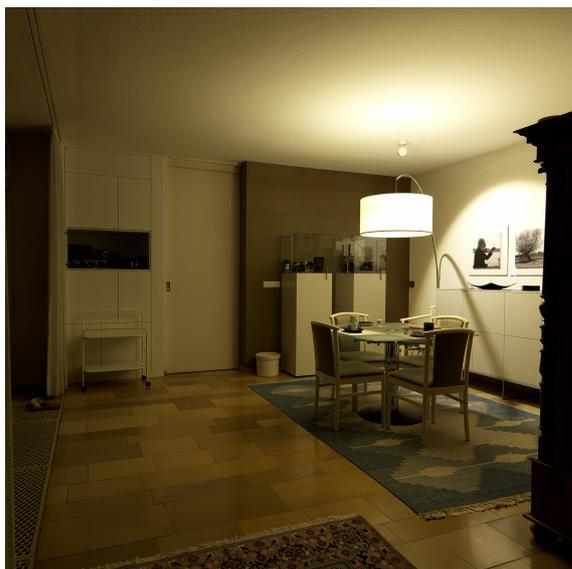
ISO 354 Bestimmung des Absorptionsgrades in Hallräumen

ISO 9053 Bestimmung des spezifischen Luftströmungswiderstandes

ISO 10534 Bestimmung des Absorptionskoeffizienten im Impedanzrohr

Ingenieurakustik (Hermann Henn, ...)	ISBN 3-528-28570-2
Technische Akustik (Ivar Veit)	ISBN 3-8023-0063-7
Fahrzeugakustik Heinemann, (Gahlau)	ISBN 3-478-93184-3
Technische Akustik Ausgewählte Kapitel	ISBN 3-88508-812-6
Geräuschminderung durch Werkstoffe	ISBN 3-8169-0154-9
Taschenbuch Akustik Band 1 und 2	VEB Best. Nr. 553 319 3
Taschenbuch der Technischen Akustik	ISBN 3-540-41242-5
Formulas of Acoustics (Mechel)	ISBN 978-3-540-76832-6
Building Acoustics (Tor Erik Vigran)	ISBN 978-0-415-42853-8
Schallabsorber und Schalldämpfer (H.V. Fuchs)	ISBN 978-3-642-01412-3
Technische Akustik (Michael Möser)	ISBN 978-3-540-89817-7
Sound-Engineering im Automobilber. (Klaus Genuit)	ISBN 978-3-642-01415-4

AKUSTIKKUNST - für eine bessere Raumakustik

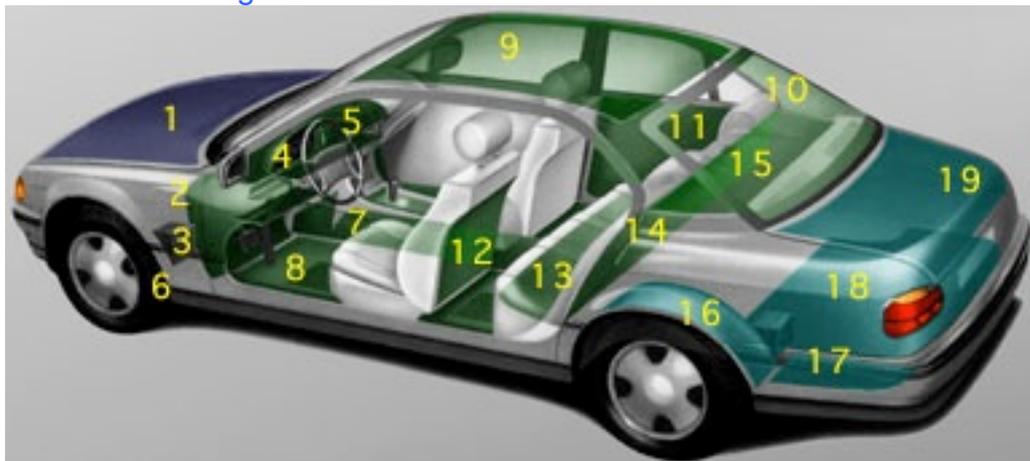


Teppiche
 Gardinen
 Polstermöbel mit Stoff bezogen
 „Akustisch wirksame“ Textile Wandbespannung
 „Akustisch wirksames“ Bild
 „Akustisch wirksamer“ Lampenschirm
 „Akustisch wirksamer“ Schrank
 ...

... und für Büros, Klassenzimmer, Konferenzräume zusätzlich:

„Akustisch wirksame“ Stellwand
 „Akustisch wirksamer“ Raumteiler
 „Akustisch wirksame“ Decke
 „Akustisch wirksame“ textile gespannte Flächen
 Helmholtzresonatoren
 Aktive Audioakustik Module
 ...

Für Kraftfahrzeuge:



- 01 Motorhaube
- 02 Stirnwand aussen & innen
- 03 Motorraum Seitenwand
- 04 Instrumententafel
- 05 Heizungsabdeckung
- 06 Bodenschild Motorraum
- 07 Tunnel
- 08 Fahrzeugboden innen & aussen
- 09 Dach
- 10 A-, B-, C-Säulen
- 11 Seitenwand und Tür
- 12 Rückenlehne Vordersitz
- 13 Rücksitzbank
- 14 Rückenlehne Rücksitzbank
- 15 Hutablage

16 Radhaus innen & außen
17 Entlüftungskanal
18 Kofferraumboden
19 Heckklappe

...

Nicht nummeriert:
Entdröhnfolien auf Blechen
Dichtungen in A-, B-, C-Säulen und Schwellern

Einige weiterführende Links mit Beispielen zur Positionierung der Absorptionsflächen in Räumen und Gebäuden

Schallabsorptionsgrade Materialien

<https://www.uni-due.de/ibpm/BauPhy/Schall/Buch/Tabellen.htm> - tab19

Nachhallzeit, Schallabsorption, Hörsamkeit | Bauphysik | Schallschutz

<https://www.baunetzwissen.de/bauphysik/fachwissen/schallschutz/nachhallzeit-schallabsorption-hoersamkeit-4407257>

Sollnachhallzeiten DIN 18041 2016

<https://www.professional-system.de/basics/hoersamkeit-in-raeumen-die-neuerungen-der-din18041/>

Projekt Klassenraumakustik

https://www.zukunftsraum-schule.de/pdf/kongress-2017/2017_vRL_Spaeh.pdf

DIN 18041-2016-03

Wolfgang Sorge

Ingenieurbüro für Bauphysik

https://www.ifbsorge.de/fileadmin/user_upload/Wissen_BauphysikInfo_2016_Die_neue_DIN_18041_Raumakustik.pdf

IndustrieverbandBüro und Arbeitswelt e.V. (IBA)

https://iba.online/site/assets/files/2259/fachschrift_8_raumakustik_web.pdf

Akustik im Büro; VGB Fachwissen; DGUV Information 215-443

http://www.vbg.de/SharedDocs/Medien-Center/DE/Broschuere/Themen/Bildschirm_und_Bueroarbeit/DGUV_Information_215_443_Akustik_im_Buero.pdf?__blob=publicationFile&v=9

FH Münster Dipl.-Ing Gernot Kubanek

<https://fh-muenster.de/fb5/downloads/departments/henze/Raumakustik.pdf>

DGUV

<http://publikationen.dguv.de/dguv/pdf/10002/i-5141.pdf>

Einige weiterführende Links mit Beispielen zur Technischen Akustik

Luftströmungswiderstand

http://www.jan-borgers.de/Wat_sunst_no_givt/Technische_Akustik/luftstroemungswiderstand.html

Luftschallabsorption

http://www.jan-borgers.de/Wat_sunst_no_givt/Technische_Akustik/luftschallabsorption.html

Fahrzeugakustik

http://www.jan-borgers.de/Wat_sunst_no_givt/Technische_Akustik/fahrzeug_akustik.html

Formelsammlung

http://www.jan-borgers.de/Wat_sunst_no_givt/Technische_Akustik/formelsammlung.html

BIOT Mathematik

http://www.jan-borgers.de/Wat_sunst_no_givt/Technische_Akustik/biot-mathematik.html

Anwendungen NORFLAG (vormals WINFLAG)

http://www.jan-borgers.de/Wat_sunst_no_givt/Technische_Akustik/anwendungen_winflag.html

Geräuschbeispiele

http://www.jan-borgers.de/Wat_sunst_no_givt/Technische_Akustik/geraeschbeispiele.html