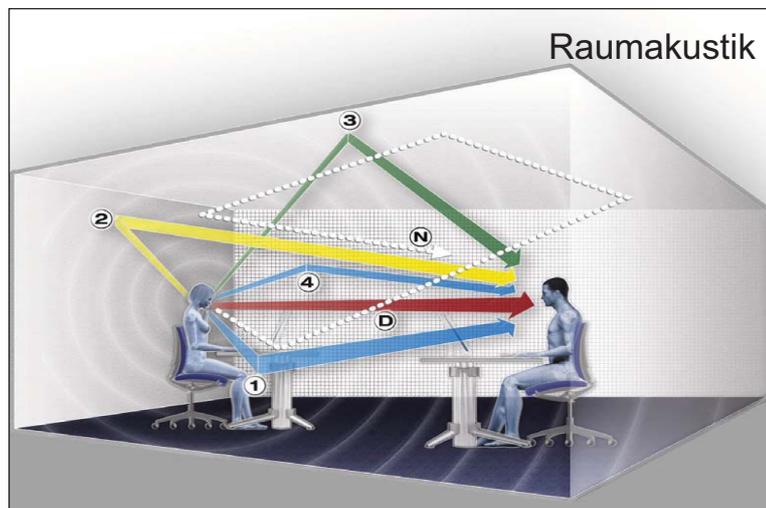


Einleitung - Bauakustik & Raumakustik



Schallschutz im Raum



Gute Hörverhältnisse & Lärminderung im Raum



Einleitung - Anforderungen Neubau

wann müssen die aktuellen Anforderungen eingehalten werden?

ÖN B 8115-3
(2005-11-01)

»neues Gebäude«
»neue Akustik«

OIB RL Nr.5 2007
OIB RL Nr.5 2011



Ausnahme: technische Gründe verhindern Absorber, z.B. Hygiene!



Einleitung - Anforderungen Bestand

wann müssen die aktuellen Anforderungen eingehalten werden?

»neue Oberfläche«
»alte Akustik«

»neues Bauteil«
»neue Akustik«



»neue Widmung«
»neue Akustik«



wenn der »akustisch relevante Teil der Konstruktion« erneuert wird!



Einleitung - akustisch kleine Räume

akustisch große

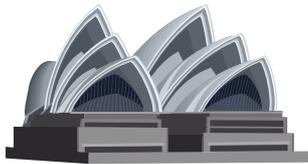
&

akustisch kleine Räume



altes Theater

moderne Oper



Besprechung

Wohnen



Büro



Gespräch



Spielen



Vortrag

99% Literatur 1% Zeit

1% der Literatur 99% unserer Zeit



Einleitung - akustisch kleine Räume

akustisch große

&

akustisch kleine Räume



altes Theater

moderne Oper



Besprechung

Wohnen



Spielen

Gespräch



Vortrag

Büro



nur für Akustik-Profi

mit Grundlagen für den Fachmann



Übersicht

Von den Grundlagen bis zum Blick in die Zukunft

Grundlagen

Anforderungen

Beispiele Nachhall

Rechnung Absorber

Blick in die Zukunft

- Absorption & Sabinsche Nachhallzeit
- Frequenzbereich & Schallfeld & Moden
- Echo & Flatterecho & Schallübertragung
- Literatur
- ÖN B 8115-3
- Vortragsraum
- Besprechungszimmer
- unendlich ausgedehnte Flächen
- einzelne kleine Akustik-Elemente
- hochabsorbierende Akustik-Elemente



Grundlagen - Schallabsorption

Absorbierende und reflektierende Flächen bestimmen die Akustik

»gute« od. »schlechte«
Absorption gibt es nicht

keine Anforderung an
Absorption einzelner
Oberflächen.

baulichen Umstände +
geplanten Nutzung =>
»richtige« Absorption.

Klassifizierung nach ÖN
EN ISO 11654 (A,B,C,..)
suggeriert Wertung

Absorption und Reflexion einer Oberfläche

Absorptionsgrad
z.B.: 0,75

Absorption
z.B.: 75 %



Reflexion
z.B.: 25 %



Grundlagen - Schallabsorption

Absorbierende und reflektierende Flächen bestimmen die Akustik

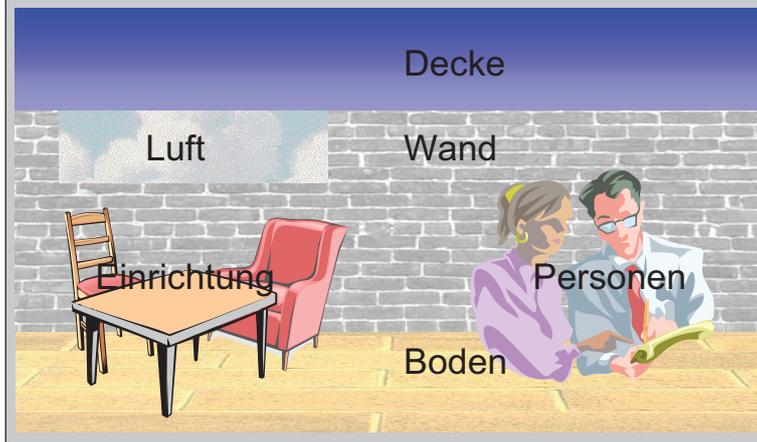
»gute« od. »schlechte«
Absorption gibt es nicht

keine Anforderung an
Absorption einzelner
Oberflächen.

baulichen Umstände +
geplanten Nutzung =>
»richtige« Absorption

Klassifizierung nach ÖN
EN ISO 11654 (A,B,C,..)
sugeriert Wertung

Schallabsorbierende Elemente in einem Raum



$$A = S \cdot \alpha \quad [\text{m}^2]$$

$$A_{\text{ges}} = S_W \cdot \alpha_W + S_B \cdot \alpha_B + S_D \cdot \alpha_D + A_E + A_P + A_L$$



Grundlagen - Sabinsche Nachhallzeit

Messung bzw. Berechnung der Nachhallzeit

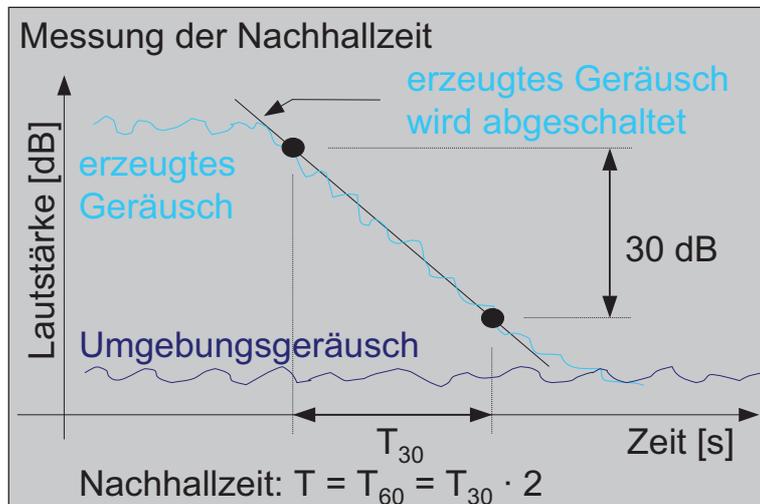
$$T = 0,16 \frac{V}{A} \quad [\text{s}]$$

Absorption gleich-
mäßig verteilt ist

keine zu hohe mittl.
Absorption ($\leq 0,25$)

keine zu extremes
Seitenverhältnis (1:5)

das Raumvolumen
 $V < 2000 \text{ m}^3$ ist



ÖN EN 12354-6 widmet der »einfachste aller akustischen Formeln« mehrere Seiten



Grundlagen - Frequenzbereich

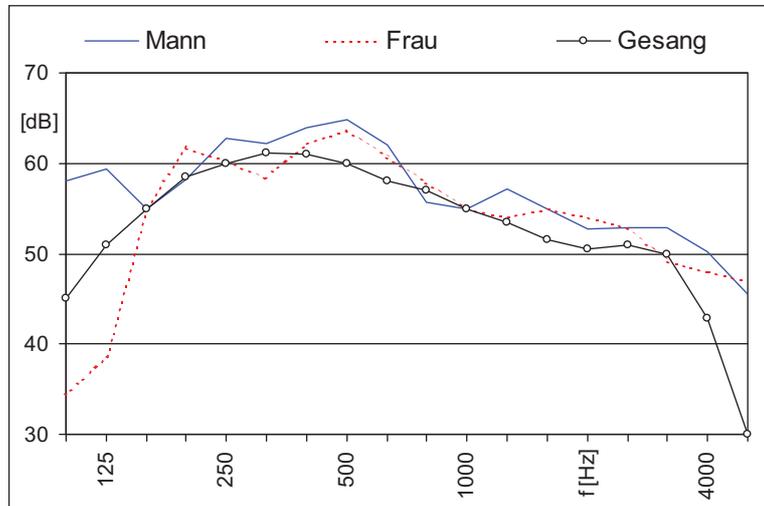
Frequenzspektrum von Mann und Frau bzw. Gesang

tiefe Töne geben
Klang und Volumen

mittlere Frequenzen
am meisten Energie

hohe verantwortlich für
Sprachverständlichkeit

Nachhallzeit kann die
Bedeutung einzelner
Bereiche an Nutzung
anpassen - ein langer
Nachhall verstärkt, ein
kurzer schwächt ab



jede Frequenz hat seine Bedeutung - Frequenzbereich 100...5000 Hz ist zu betrachten



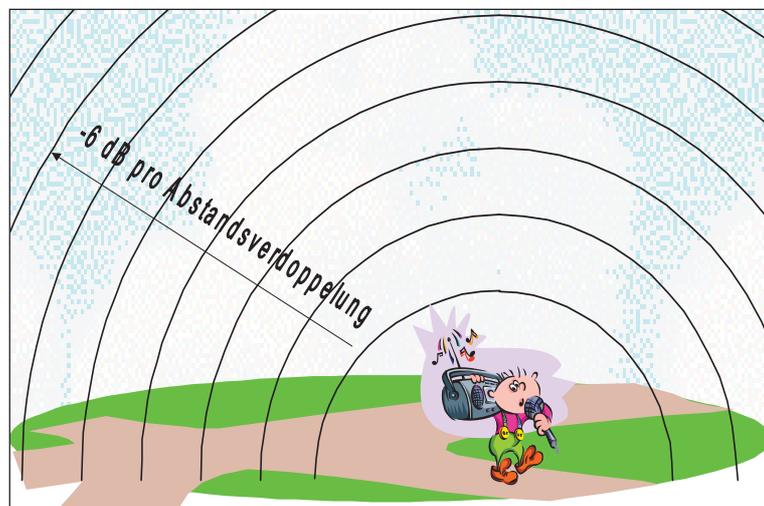
Grundlagen - Schallfeld

Freies Schallfeld

Ein ungestörtes
Ereignis im Freien

Nur die Schallquelle
bestimmt das
Schallfeld

Die Lautstärke wird nur
durch die Entfernung
von der Schallquelle
bestimmt





Grundlagen - Schallfeld

Diffuses Schallfeld

Ein perfekt diffuses Schallfeld (Hallraum)

Der Schall kommt aus allen Richtungen mit gleicher Stärke

Die Lautstärke ist im ganzen Raum (abseits der Oberflächen) ist gleich



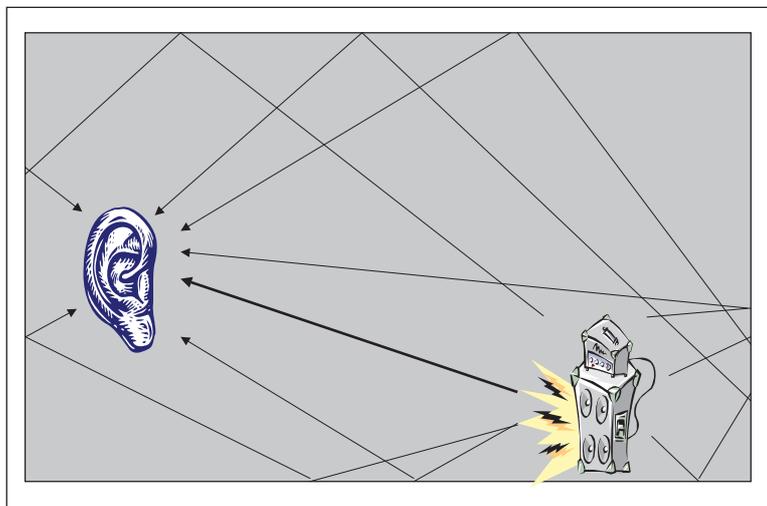
Grundlagen - Schallfeld

Gesamtschallfeld

Freies und diffuses Schallfeld im Raum

Die Oberflächen, d.h. Absorption & Reflexion sind bestimmend

Das Zusammenspiel aus direktem und reflektiertem Schall ist entscheidend



Grundlagen - Raummoden

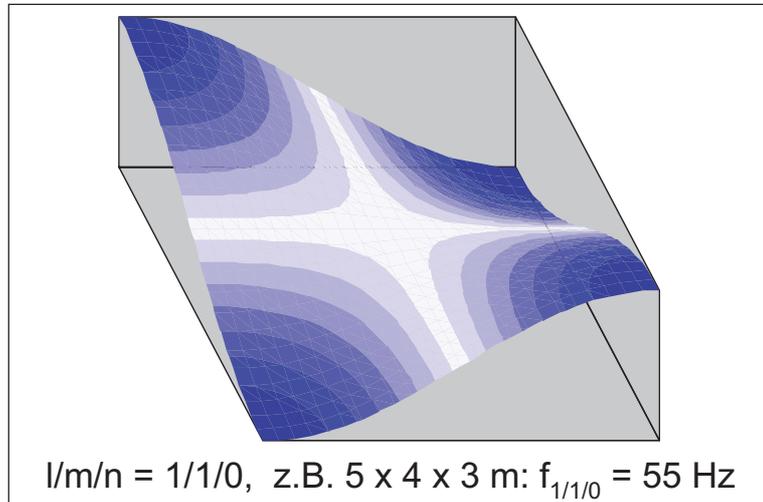
Raumabmessung und (x-mal halbe) Schallwelle passen zusammen

Berechnung
(rechteckiger Raum)

$$f_{l,m,n} = \frac{c}{2} \sqrt{\frac{l^2}{L^2} + \frac{m^2}{B^2} + \frac{n^2}{H^2}}$$

Grenzwert
(Schröderfrequenz)

$$f_{SCH} = 2000 \sqrt{T / V}$$



$$T = 1 \text{ s}, V = 50 / 100 / 500 / 1000 \text{ m}^3 \Rightarrow f_{SCH} = 283 / 200 / 89 / 63 \text{ Hz}$$

Grundlagen - Raummoden

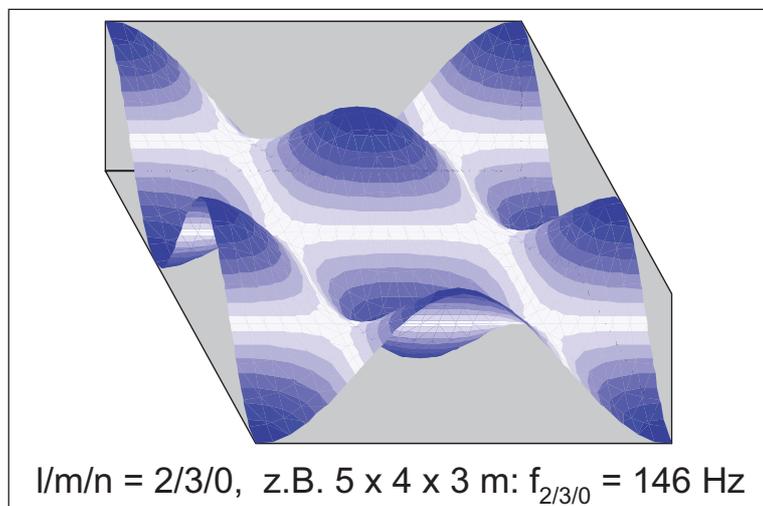
Raumabmessung und (x-mal halbe) Schallwelle passen zusammen

Berechnung
(rechteckiger Raum)

$$f_{l,m,n} = \frac{c}{2} \sqrt{\frac{l^2}{L^2} + \frac{m^2}{B^2} + \frac{n^2}{H^2}}$$

Grenzwert
(Schröderfrequenz)

$$f_{SCH} = 2000 \sqrt{T / V}$$



$$T = 1 \text{ s}, V = 50 / 100 / 500 / 1000 \text{ m}^3 \Rightarrow f_{SCH} = 283 / 200 / 89 / 63 \text{ Hz}$$



Grundlagen - Raummoden

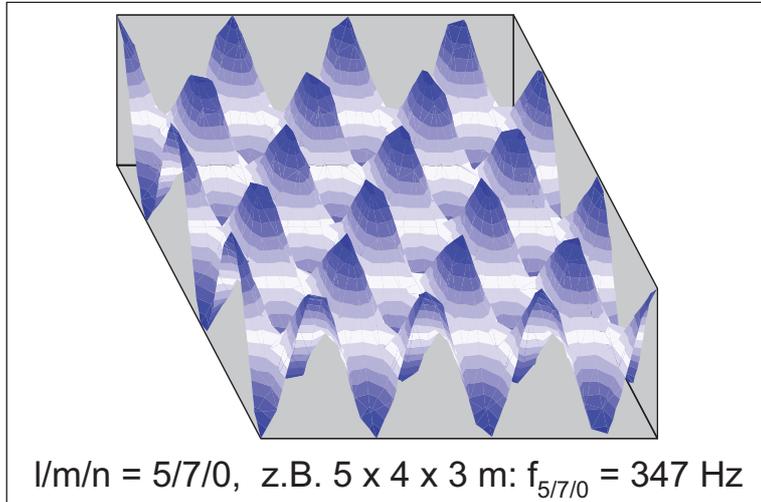
Raumabmessung und (x-mal halbe) Schallwelle passen zusammen

Berechnung
(rechteckiger Raum)

$$f_{l,m,n} = \frac{c}{2} \sqrt{\frac{l^2}{L^2} + \frac{m^2}{B^2} + \frac{n^2}{H^2}}$$

Grenzwert
(Schröderfrequenz)

$$f_{SCH} = 2000 \sqrt{T / V}$$



$$T = 1 \text{ s}, V = 50 / 100 / 500 / 1000 \text{ m}^3 \Rightarrow f_{SCH} = 283 / 200 / 89 / 63 \text{ Hz}$$



Grundlagen - Raummoden

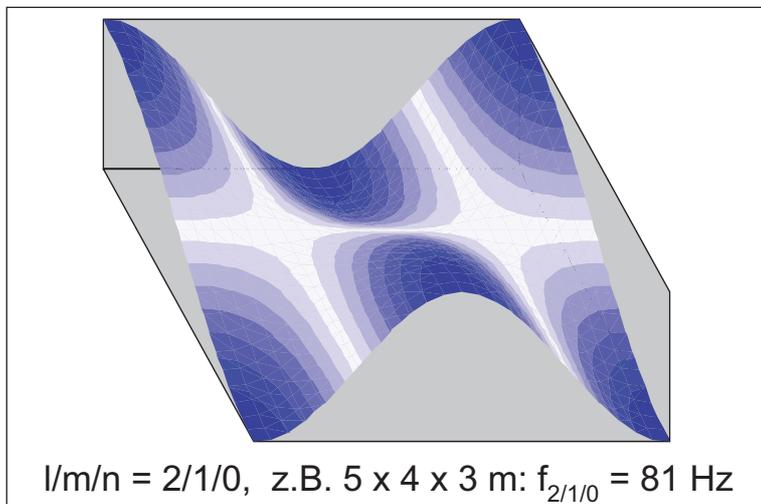
Raumabmessung und (x-mal halbe) Schallwelle passen zusammen

Berechnung
(rechteckiger Raum)

$$f_{l,m,n} = \frac{c}{2} \sqrt{\frac{l^2}{L^2} + \frac{m^2}{B^2} + \frac{n^2}{H^2}}$$

Grenzwert
(Schröderfrequenz)

$$f_{SCH} = 2000 \sqrt{T / V}$$



Raummoden können nur durch Absorption gemindert - aber nicht verhindert - werden

Grundlagen - Echo & Flatterecho

In der Natur wunderschön - in Räumen akustisch unerwünscht

Um Signale getrennt zu erkennen müssen diese 0,005...0,01 s getrennt sein (bei 340 m/s => 1,7...3,4 m)

Bei gleichem Signalen (Reflexionen) ist die Zeit wesentlich länger, ca. 0,05 s (17 m)

Ab ca. 0,1 s (34 m) ist eine Reflexion eine vollends eigenständige Information = Echo



früher Schall vom Ohr aufsummiert, später Schall (> 0,05 s) verwischt Klangeindruck

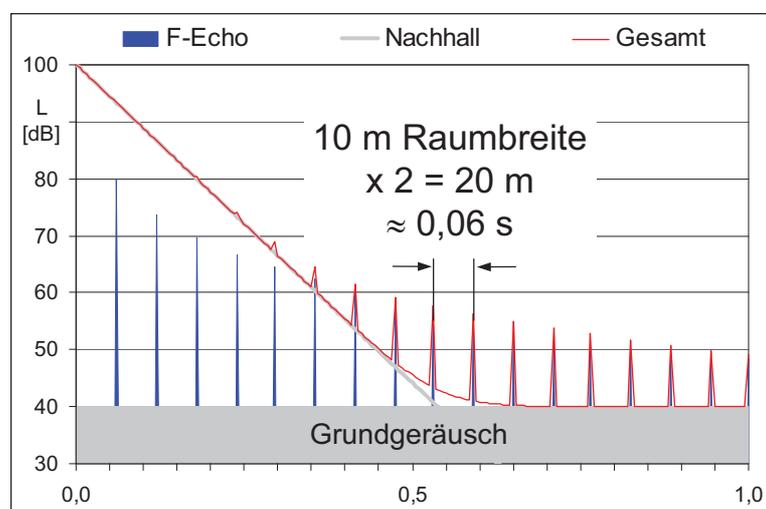
Grundlagen - Echo & Flatterecho

Mehrfachreflexionen - der größte Feind der Raumakustik

In großen Räumen, Abmessung > 8,5 m, kann unser Gehör das Flatterecho getrennt wahrnehmen

Der vom Menschen empfundene Nachhall wird sehr stark von diesen Flatterechos bestimmt

Mehrfachreflexionen müssen unbedingt vermieden werden





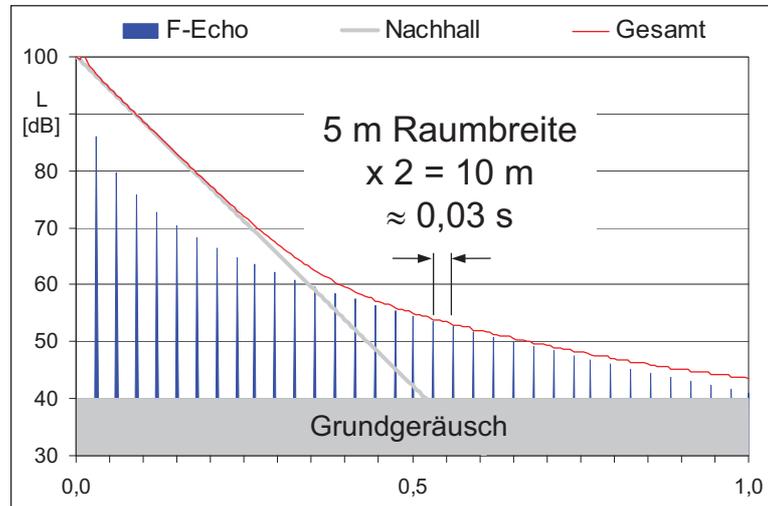
Grundlagen - Echo & Flatterecho

Mehrfachreflexionen - der größte Feind der Raumakustik

In kleinen Räumen,
Abmessung $< 8,5$ m,
kann unser Gehör
das Flatterecho
nicht wahrnehmen

Dennoch existieren
Mehrfachreflexionen
und können den
Nachhall im Raum
erheblich verlängern

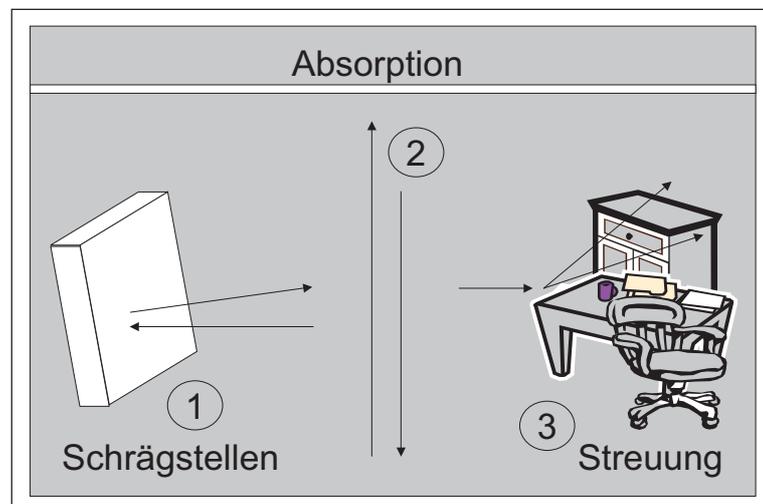
Mehrfachreflexionen
müssen unbedingt
vermieden werden



Grundlagen - Echo & Flatterecho

Wie können Flatterechos vermieden werden?

1. Schrägstellen einer der beiden gegenüberliegenden parallelen Flächen (Winkel $\geq 5^\circ$, Fläche $\geq \frac{1}{2}\lambda$)
2. Absorption an einer der beiden gegenüberliegenden Flächen (Absorption $\geq 50\%$)
3. Flächige Einrichtung, keine Pflanzen, welche den Schall ausreichend streut (Fläche $\geq \frac{1}{2}\lambda$, Gewicht ≥ 1 kg/m²)



Schrägstellen von Wand und Decke verhindert Flatterechos, nicht aber Raummoden



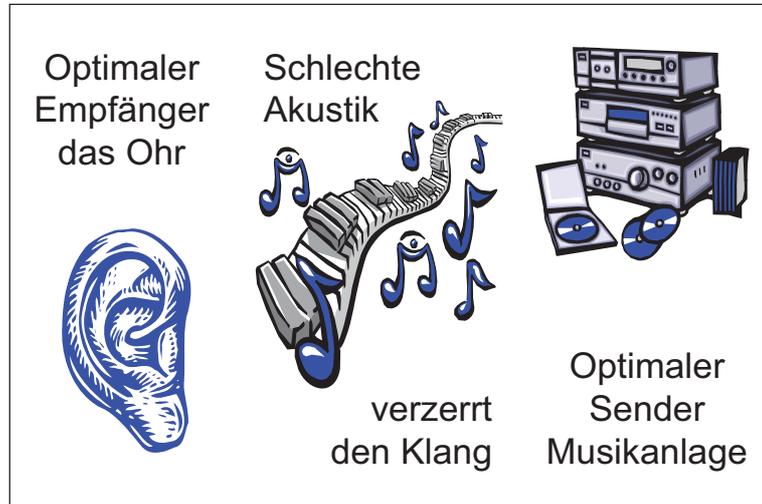
Grundlagen - Schallübertragung

Schlechte Akustik verzehrt den Klang

Grundsätzlich sollten sich Räume neutral verhalten, d.h. ein gleich langer Hall für alle Frequenzen

Dies unterstützt, dass Sprache, Gesang und Musik möglichst unverzerrt übertragen wird.

Die Darbietung, nicht der Raum bestimmt das »Klangerlebnis«



Anforderungen - Literatur

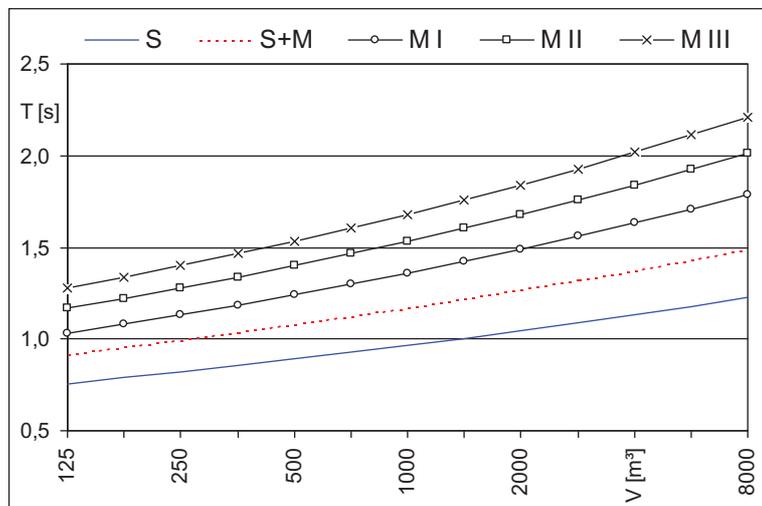
Nachhallzeit gemäß Literatur (Fasold - Sonntag – Winkler, 1987)

In größeren Räumen erwartet man einen längeren Hall

Dies ergibt sich aus Zusammenhang von Volumen & Oberfläche

Bei Vergrößerung eines Raumes wächst das Volumen stärker als die Oberfläche

Der Nachhall nimmt (bei gleichbleibender Ausstattung) zu



S: Sprache, S+M: Sprache & Musik, M I-III: verschiedene M

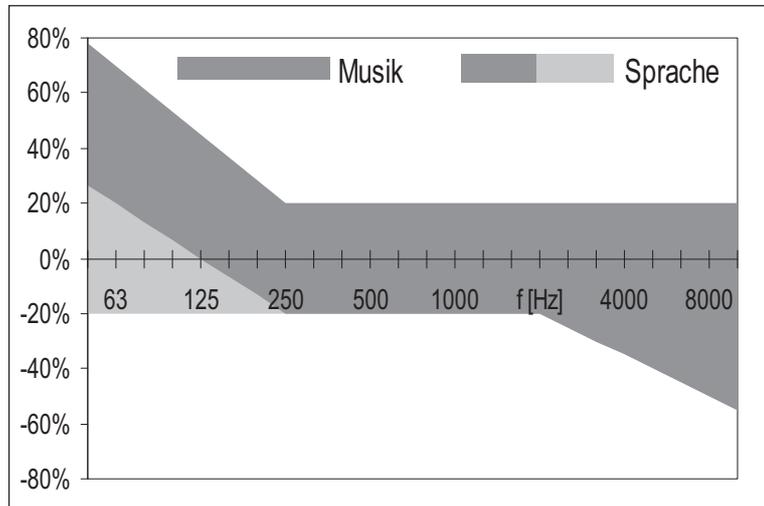
Anforderungen - Literatur

Toleranzbereich gemäß Literatur (Fasold - Sonntag – Winkler, 1987)

Frequenzverlauf soll konstant sein

Bei Musikdarbietung ist ein Anstieg bei tiefen Frequenzen zulässig (»Wärme«)

Bei hohen Frequenzen ist ein kürzerer Hall (Absorption der Luft!) oft unvermeidlich



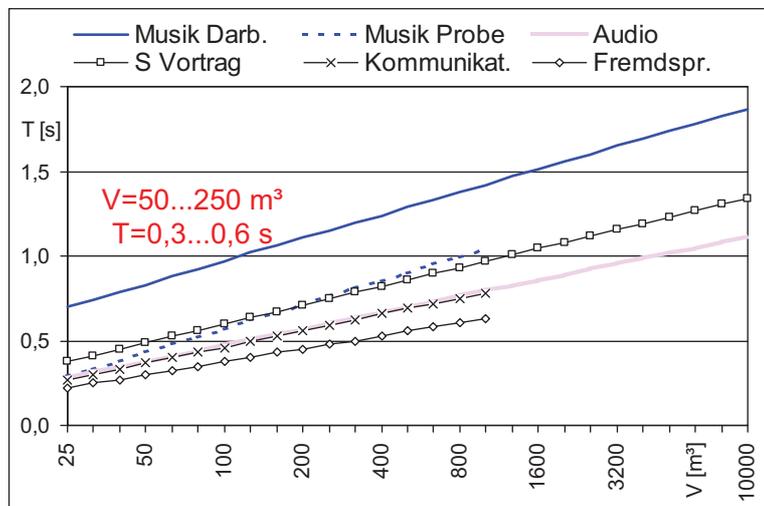
Anforderungen - ÖN B 8115-3

Nachhallzeit gemäß ÖN B 8115-3 (= OIB RL 6 = Baurecht)

Anforderungen decken sich mit DIN 18041

Grundsätzlich gibt es Trend zu kürzeren Nachhallzeiten. Je kürzer der Nachhall, desto besser die Verständlichkeit auf kurze Entfernung

In Räume mit elektroakustischer Verstärkung (Audio!) soll Hall immer kurz sein



ca. ¼ der Gesamtoberflächen muss in »Alltagsräumen« absorbierend ($\alpha \geq 60\%$) sein



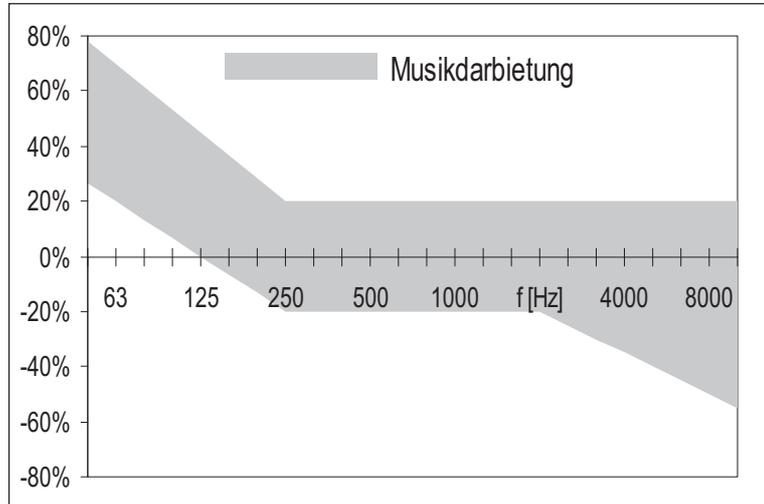
Anforderungen - ÖN B 8115-3

Toleranzbereich gemäß ÖN B 8115-3 (= OIB RL 6 = Baurecht)

Frequenzverlauf soll
konstant sein

Bei Musikdarbietung
ist ein Anstieg bei
tiefen Frequenzen
zulässig (»Wärme«)

Bei hohen Frequenzen
ist ein kürzerer Hall
(Absorption der Luft!)
oft unvermeidlich



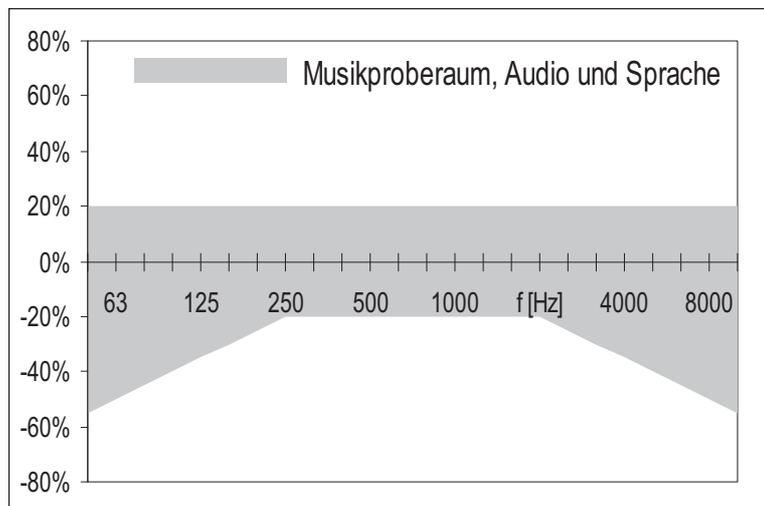
Anforderungen - ÖN B 8115-3

Toleranzbereich gemäß ÖN B 8115-3 (= OIB RL 6 = Baurecht)

Frequenzverlauf soll
konstant sein

Sprachverständlichkeit
erlaubt Abfall bei tiefen
Tönen (kein Beitrag
zur Verständlichkeit)

Bei hohen Frequenzen
ist ein kürzerer Hall
(Absorption der Luft!)
oft unvermeidlich





Anforderungen - ÖN B 8115-3

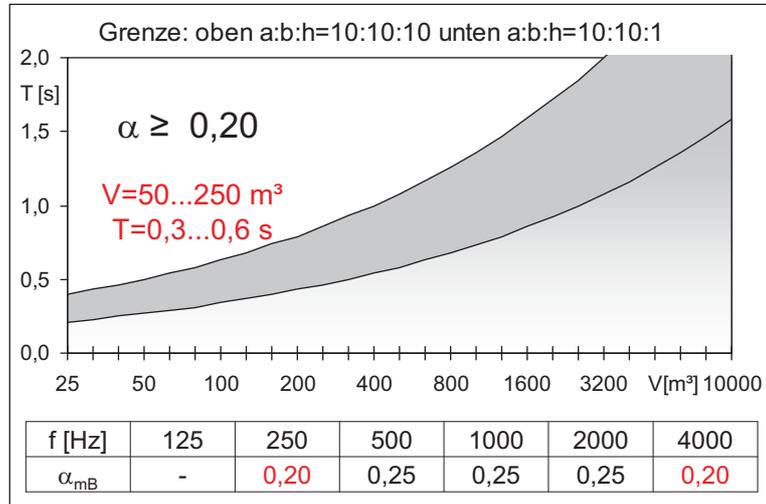
Lärminderung gemäß ÖN B 8115-3 (α_{mB} = OIB RL 6 = Baurecht)

Anforderung für alle Räume in denen Lärm entsteht, insbesondere

Arbeitsräume aller Art & Größe sowie Pausenräume und Gänge in Schulen & KiGa (ÖN)

Arbeitsräume, Werkstätten, Büros, KiGa & Speiseräume (OIB)

α_{mB} ... mittlerer Schallabsorptionsgrad (Raum-) Begrenzungsflächen



ca. ¼ der Gesamtoberflächen muss in »Alltagsräumen« absorbierend ($\alpha \geq 60\%$) sein



Anforderungen - ÖN B 8115-3

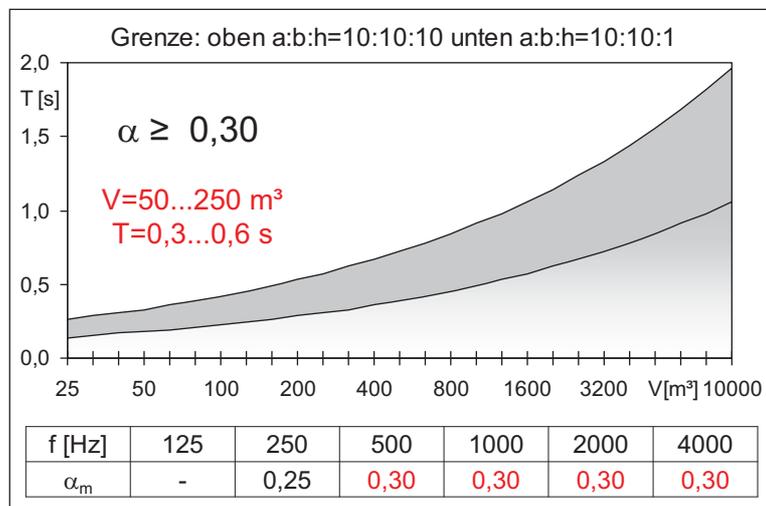
Lärminderung gemäß ÖN B 8115-3

Anforderung für alle Räume in denen Lärm entsteht, insbesondere

Arbeitsräume aller Art & Größe sowie Pausenräume und Gänge in Schulen & KiGa (ÖN)

Arbeitsräume, Werkstätten, Büros, KiGa & Speiseräume (OIB)

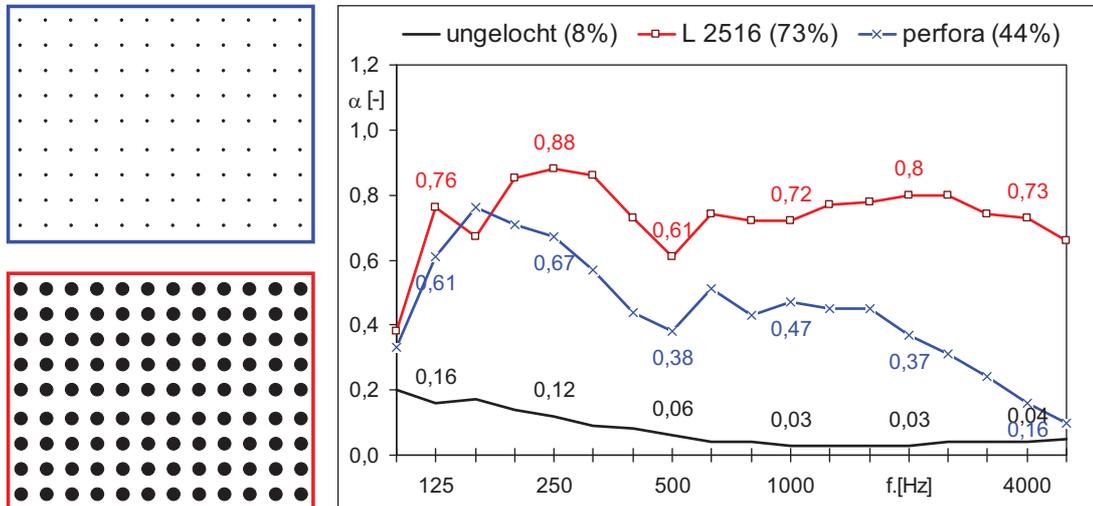
α_m ... mittlerer Schallabsorptionsgrad in eingerichteten Räumen



ca. ¼ der Gesamtoberflächen muss in »Alltagsräumen« absorbierend ($\alpha \geq 60\%$) sein

Praktische Beispiele

2 Akustikdecken im Vergleich sowie schallharte Referenzdecke



Praktische Beispiele - Vortragsraum 71 m²

10,0 x 7,1 x 3,0 m (213 m³)

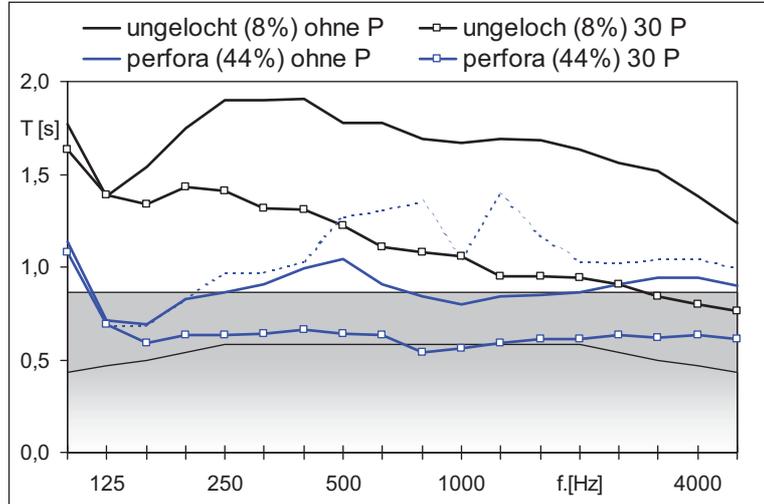
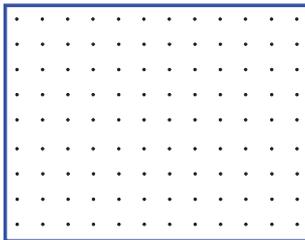
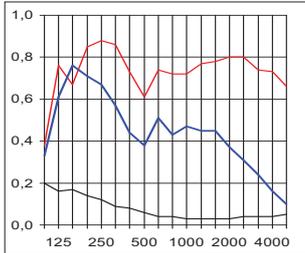
30 einfache Holzstühle

15 einfache Holztische



Praktische Beispiele - Vortragsraum 71 m²

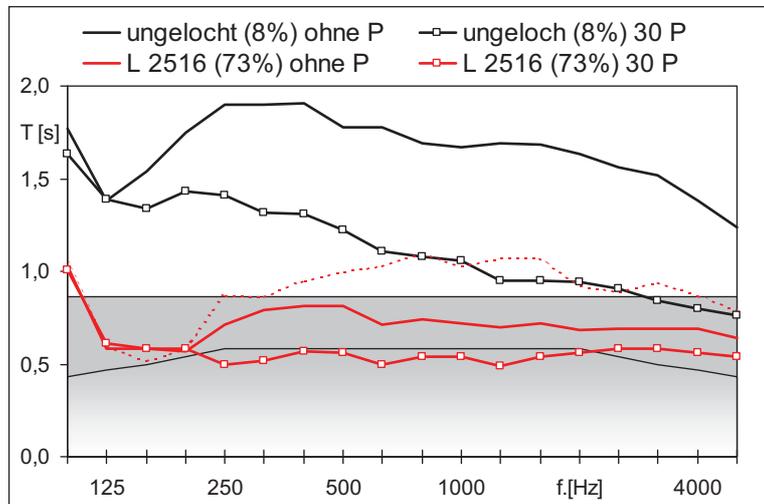
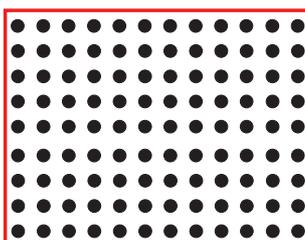
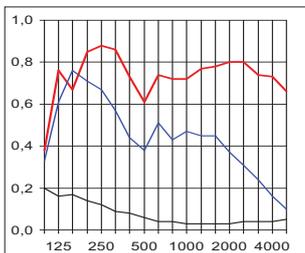
Raum eingerichtet: ohne Personen bzw. mit 30 Kindern



mit A-Decke im leeren Raum (strichlierte Linie)

Praktische Beispiele - Vortragsraum 71 m²

Raum eingerichtet: ohne Personen bzw. mit 30 Kindern

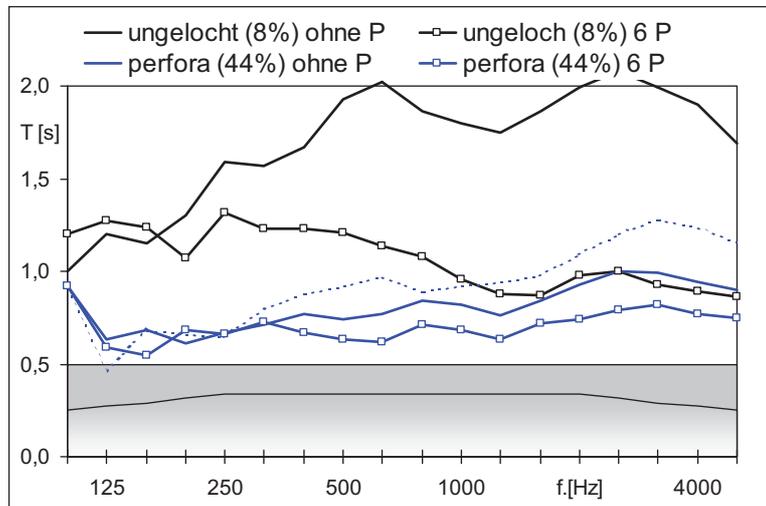
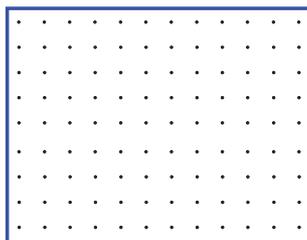
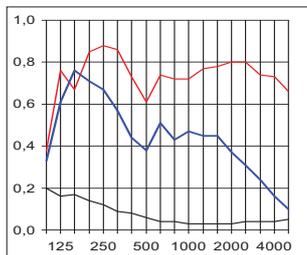


mit A-Decke im leeren Raum (strichlierte Linie)



Praktische Beispiele - Besprechungszimmer 23 m²

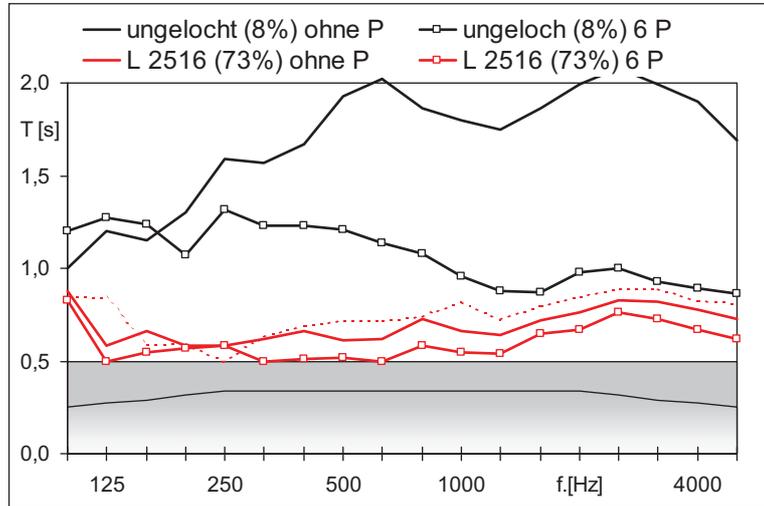
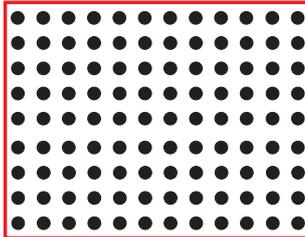
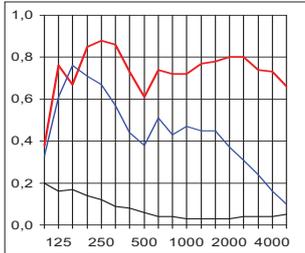
Raum eingerichtet: ohne Personen bzw. 6 Erwachsenen (PVC)



mit A-Decke im leeren Raum (strichlierte Linie)

Praktische Beispiele - Besprechungszimmer 23 m²

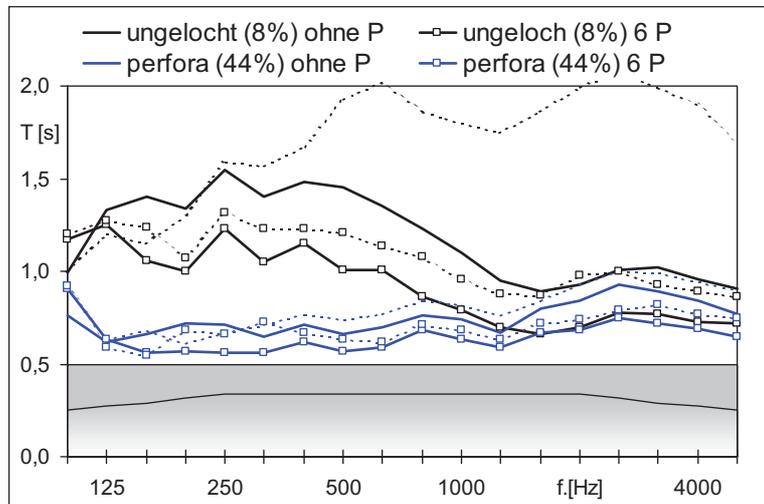
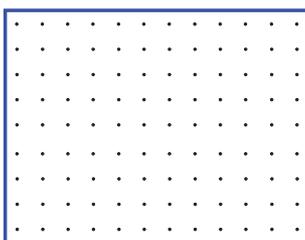
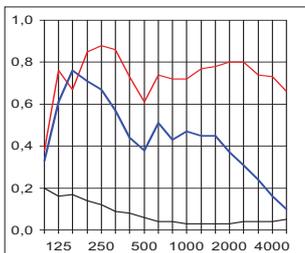
Raum eingerichtet: ohne Personen bzw. 6 Erwachsenen (PVC)



mit A-Decke im leeren Raum (strichlierte Linie)

Praktische Beispiele - Besprechungszimmer 23 m²

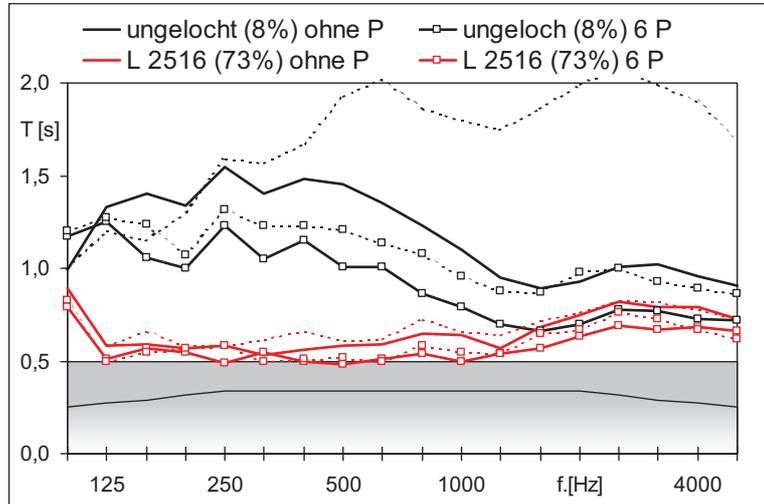
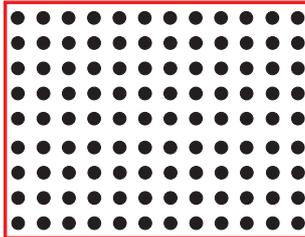
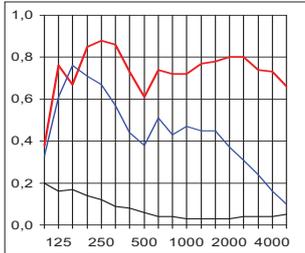
Raum eingerichtet: ohne Personen bzw. 6 Erwachsenen (Teppich)



im Vergleich zu PVC-Boden (strichlierte Linie)

Praktische Beispiele - Besprechungszimmer 23 m²

Raum eingerichtet: ohne Personen bzw. 6 Erwachsenen (Teppich)



im Vergleich zu PVC-Böden (strichlierte Linie)

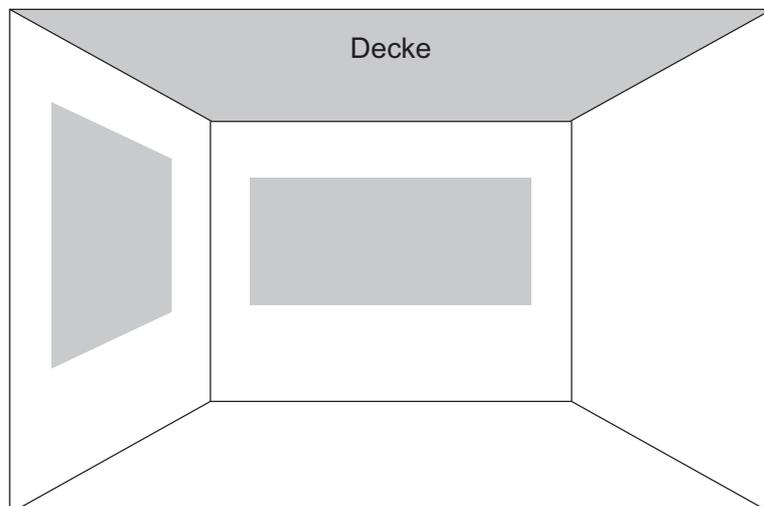
Praktische Beispiele - Besprechungszimmer 23 m²

Messung mit Wandabsorber (Verbundplattenresonator, VPR)

Zusätzliche Absorber
an nicht gegenüber-
liegenden Wänden

1 x 750 x 1000 mm
1 x 1000 x 1500 mm
(0.75+1.50 = 2.25 m²)

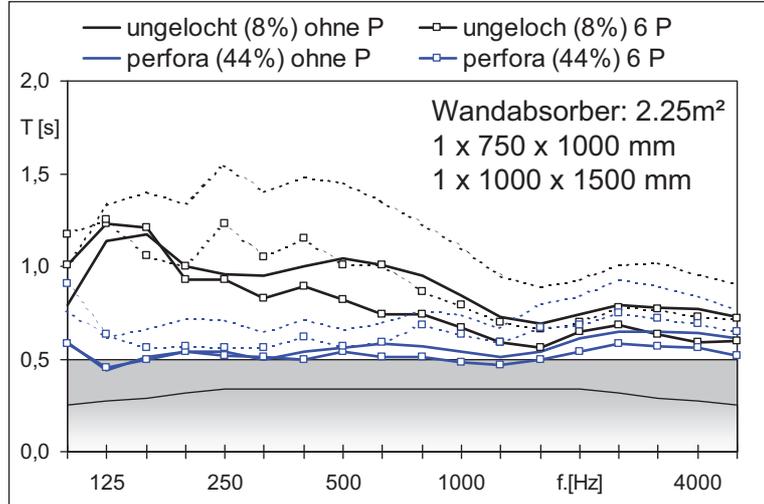
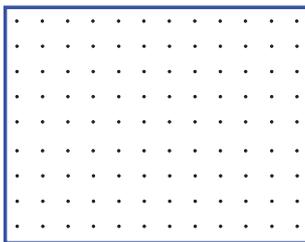
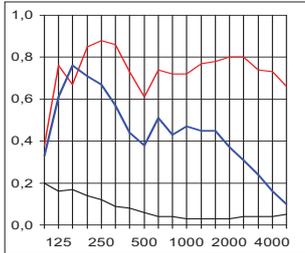
Wenig Fläche an der
richtigen Stelle hat
eine große Wirkung



Akustische Maßnahmen in allen Dimensionen = Voraussetzung für diffuses Schallfeld

Praktische Beispiele - Besprechungszimmer 23 m²

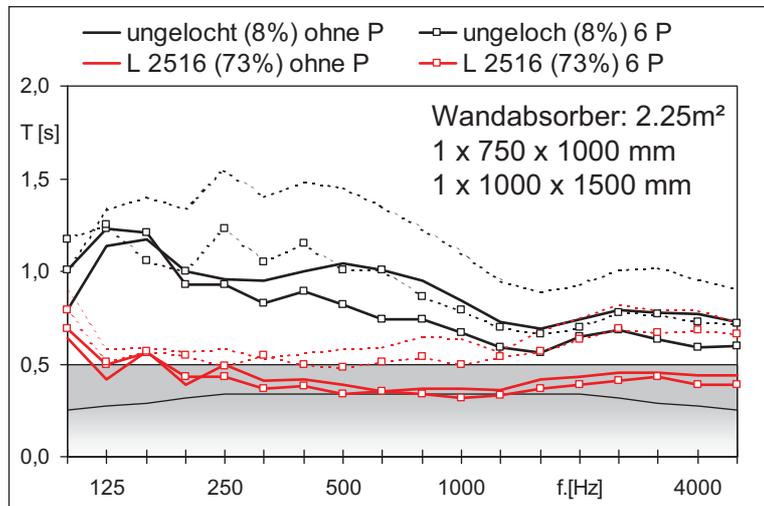
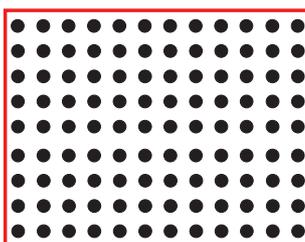
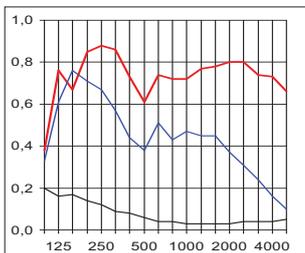
Raum eingerichtet: ohne Personen bzw. 6 Erwachsenen (Teppich)



Werte ohne Wandabsorber (strichlierte Linie)

Praktische Beispiele - Besprechungszimmer 23 m²

Raum eingerichtet: ohne Personen bzw. 6 Erwachsenen (Teppich)



Werte ohne Wandabsorber (strichlierte Linie)

Berechnung poröser Absorber

Absorption individuell auf den bestehenden Raum auslegen

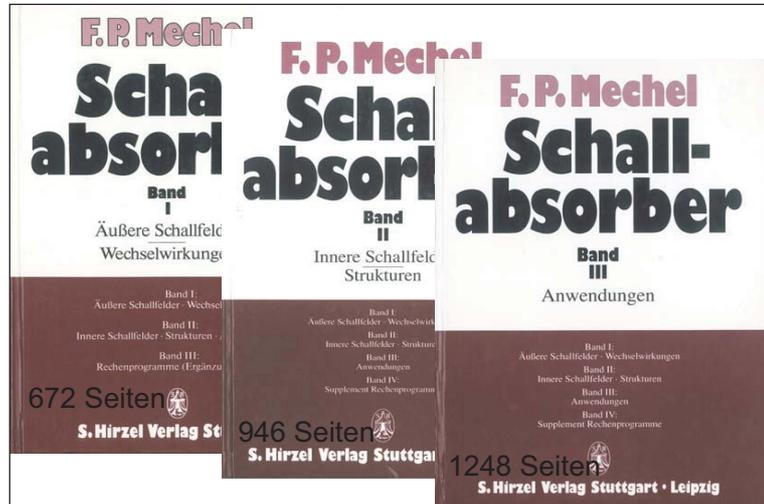
Professor F.P. Mechels
Trilogie mit 2866 Seiten
»Schallabsorber« I...III

Poröser Absorber:

- Mineralwolle
- Polyesterwolle
- Alu- und Stahlwolle
- Schaumstoff
- Glasgranulatplatten

inklusive Abdeckung:

- Folie & Vlies
- Textilgewebe
- Lochplatten



Grundlage der Berechnung ist auch Teil der europäischen Normung: ÖN EN 12354-6

Berechnung poröser Absorber - Akustik-Verkleidung

»unendlich ausgedehnte« Akustik-Verkleidung (poröse Absorber)

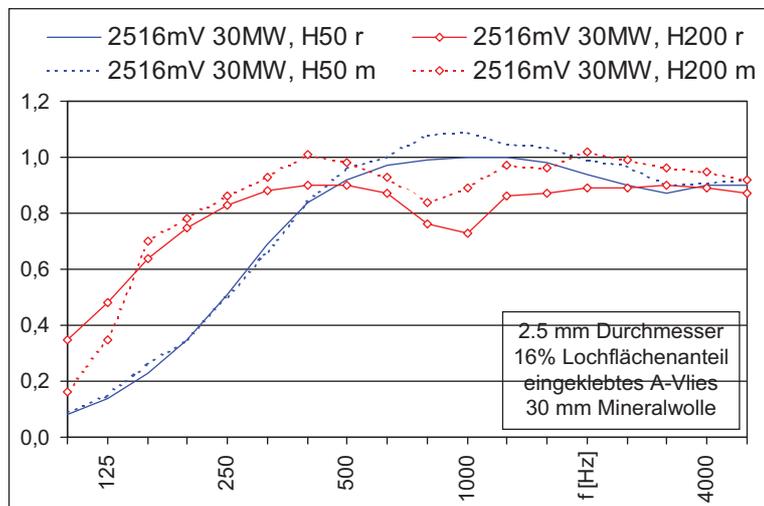
Professor F.P. Mechels
Trilogie mit 2866 Seiten
»Schallabsorber« I...III

Poröser Absorber:

- Mineralwolle
- Polyesterwolle
- Alu- und Stahlwolle
- Schaumstoff
- Glasgranulatplatten

inklusive Abdeckung:

- Folie & Vlies
- Textilgewebe
- Lochplatten



Grundlage der Berechnung ist auch Teil der europäischen Normung: ÖN EN 12354-6

Berechnung poröser Absorber - Akustik-Elemente

einzelne kleine »Akustik-Elemente« (poröse Absorber)

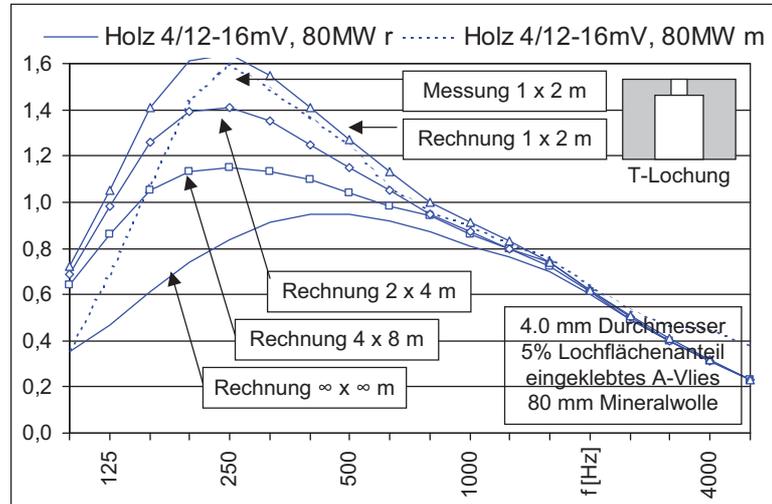
Professor F.P. Mechels
 Trilogie mit 2866 Seiten
 »Schallabsorber« I...III

Poröser Absorber:

- Mineralwolle
- Polyesterwolle
- Alu- und Stahlwolle
- Schaumstoff
- Glasgranulatplatten

inklusive Abdeckung:

- Folie & Vlies
- Textilgewebe
- Lochplatten



Kanteneffekt: einzelne Akustik-Elemente können eine Schallabsorption >> 100% haben

Berechnung poröser Absorber - Akustik-Elemente

einzelne kleine »Akustik-Elemente« (poröse Absorber)

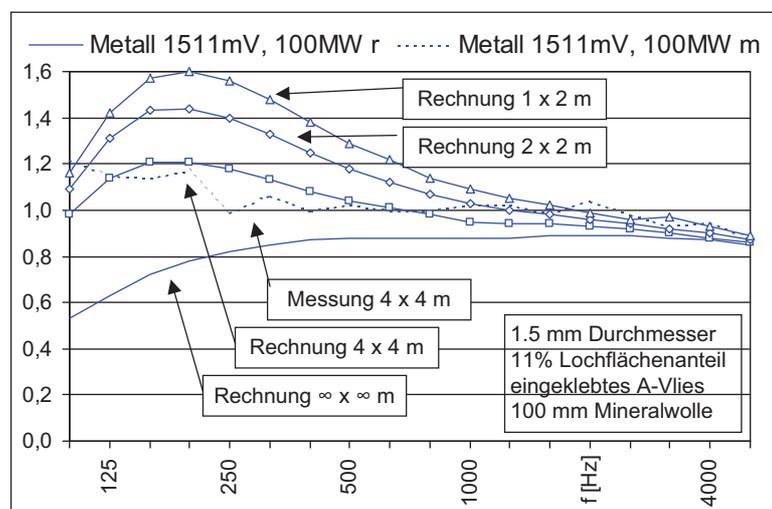
Professor F.P. Mechels
 Trilogie mit 2866 Seiten
 »Schallabsorber« I...III

Poröser Absorber:

- Mineralwolle
- Polyesterwolle
- Alu- und Stahlwolle
- Schaumstoff
- Glasgranulatplatten

inklusive Abdeckung:

- Folie & Vlies
- Textilgewebe
- Lochplatten



Kanteneffekt: einzelne Akustik-Elemente können eine Schallabsorption >> 100% haben

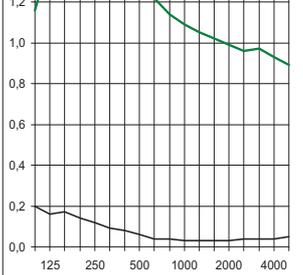


Akustik-Elemente - Besprechungszimmer 23 m²

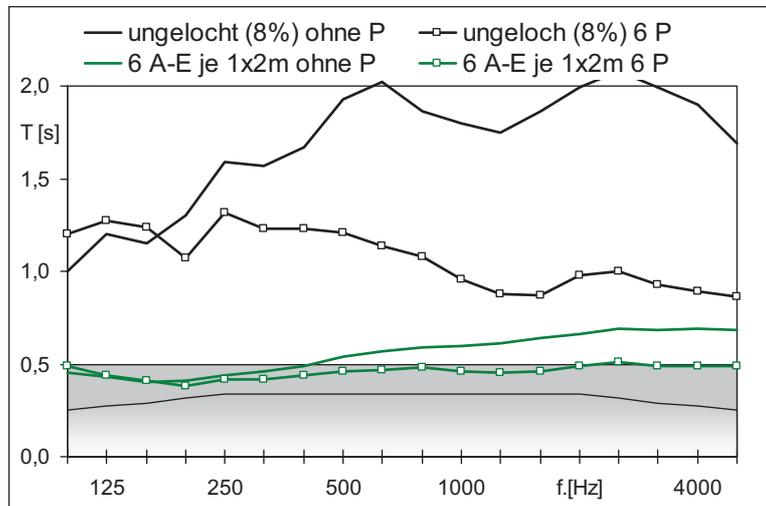
- 5,2 x 4,5 x 3,0 m (70 m³)
- 8 gepolsterte Stühle
- 4 einfache Holztische
- 6 Akustik-Elemente
- je 1,0 x 2,0 x 0,1 m
- gelochtes Metall 1511
- 1.5 mm Durchmesser
- 11% Lochflächenanteil
- 100mm MW (ohne Luft)

Akustik-Elemente - Besprechungszimmer 23 m²

Raum eingerichtet: ohne Personen bzw. 6 Erwachsenen (PVC)



6 Akustik-Elemente
 je 1,0 x 2,0 x 0,1 m
 gelochtes Metall 1511
 1.5 mm Durchmesser
 11% Lochflächenanteil
 100mm MW (ohne Luft)



Hochabsorbierende A-E: Wenig Elemente sinnvoll angeordnet - optimale Raumakustik

Akustik-Elemente - Hersteller

einige Beispiel akustisch und optisch attraktiver Akustik-Elemente

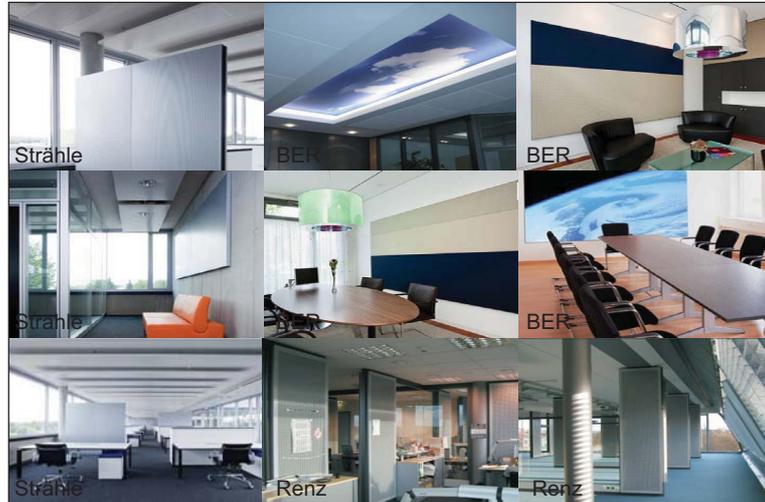
Auszug von Herstellern:

Strähle Raum-Systeme GmbH
 Gewerbestraße 6
 D-71332 Waiblingen
 www.straehle.de

BER Deckensysteme GmbH
 Industriestraße 12
 D-33161 Hövelhof
 www.ber-deckensysteme.de

RENZ GmbH
 Forchenweg 37
 D-71134 Aidlingen
 www.renz-akustik.de

Akustik-elemente können sehr einfach selbst gebaut werden!



Hochabsorbierende A-E sind voll gefüllt mit Absorbermaterial (ohne Lufthohlraum!)

Zusammenfassung

Die Raumakustik ist das Stiefkind der Bauphysik

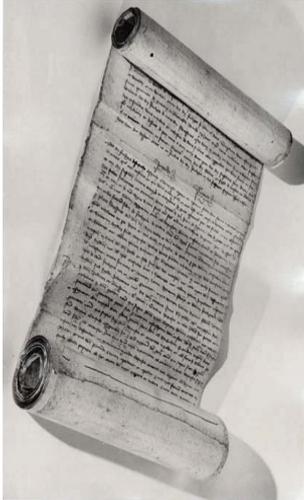


- B 8115-3: Anforderung alle »Alltagsräume«
- OIB Richtlinie 5 »Schallschutz« ist Baurecht
- Raumakustik ist Pflicht Neubau & Sanierung
- klare Anforderungen (Baurecht)
- wenige Grundlagen (diffuses Schallfeld)
- einfache Planung ($T = 0,16 \cdot V/T$)
- große Flächen: ca. $\frac{1}{4}$ der Gesamtoberfläche
- individuelle Auslegung: berechnete Absorber
- minimale Fläche: hochwirksame A-Elemente



Literatur

Auszug der verwendeten Literatur



- [01] »Schallabsorber, Band I«
Fridolin P. Mechel, S. Hirzel Verlag, Stuttgart 1989
- [02] »Schallabsorber, Band II«
Fridolin P. Mechel, S. Hirzel Verlag, Stuttgart 1995
- [03] »Schallabsorber, Band III«
Fridolin P. Mechel, S. Hirzel Verlag, Stuttgart 1998
- [04] »Taschenbuch der Technischen Akustik«
M. Heckl & H. A. Müller, Springer-Verlag, Berlin 1995
- [05] »Bau- und Raumakustik«
Fasold, Sonntag, Winkler, VEB Verlag für Bauwesen, Berlin 1987
- [06] »Active Control of Sound«
P. A. Nelson, S. J. Elliott, Academic Press, London 1992

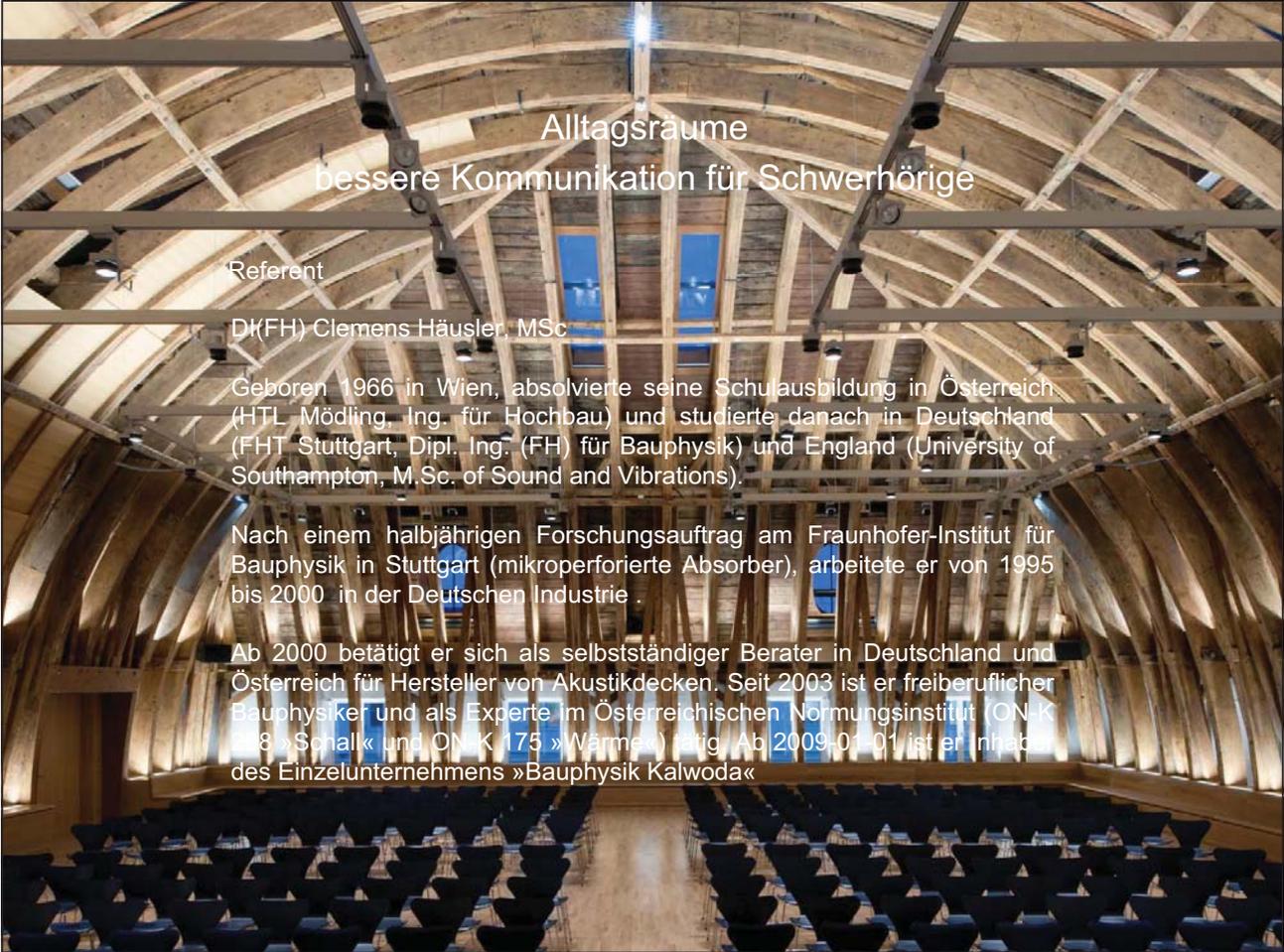


Literatur

Auszug der verwendeten Literatur



- [07] »Die Wahre Schallabsorption«, Clemens Häusler
Bauphysikertreffen 2010 FHT Stuttgart, Stuttgart 2010
- [08] ÖNORM EN 12354-6: Bauakustik - Berechnung der akustischen Eigenschaften von Gebäuden aus den Bauteileigenschaften (2004 06 01)
- [09] ÖNORM EN ISO 354: Akustik - Messung der Schallabsorption in Hallräumen (2003 11 01)
- [10] ÖNORM EN ISO 11654 : Akustik - Schallabsorber für die Anwendung in Gebäuden - Bewertung der Schallabsorption (1997 09 01)
- [11] ÖNORM B 8115-3: Schallschutz und Raumakustik im Hochbau: Raumakustik (2005 11 01)
- [12] DIN 18041: Hörsamkeit in kleinen bis mittelgroßen Räumen (2004 05)



Alltagsräume bessere Kommunikation für Schwerhörige

Referent

DK(FH) Clemens Häusler, MSc

Geboren 1966 in Wien, absolvierte seine Schulausbildung in Österreich (HTL Mödling, Ing. für Hochbau) und studierte danach in Deutschland (FHT Stuttgart, Dipl. Ing. (FH) für Bauphysik) und England (University of Southampton, M.Sc. of Sound and Vibrations).

Nach einem halbjährigen Forschungsauftrag am Fraunhofer-Institut für Bauphysik in Stuttgart (mikroperforierte Absorber), arbeitete er von 1995 bis 2000 in der Deutschen Industrie.

Ab 2000 betätigt er sich als selbstständiger Berater in Deutschland und Österreich für Hersteller von Akustikdecken. Seit 2003 ist er freiberuflicher Bauphysiker und als Experte im Österreichischen Normungsinstitut (ON K 218 »Schall« und ON K 175 »Wärme«) tätig. Ab 2009-01-01 ist er Inhaber des Einzelunternehmens »Bauphysik Kalwoda«