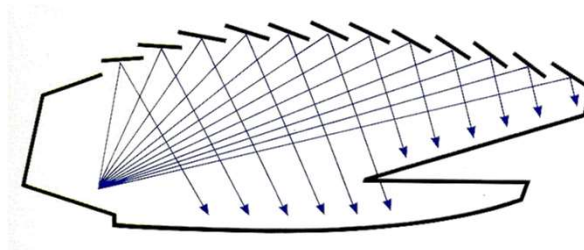


Grundlagen der Raumakustik



Prof. Oliver Curdt
Audiovisuelle Medien
HdM Stuttgart

Schallausbreitung im Raum

- Reflexion
- Absorption
 - Dissipation (Wärmeumwandlung)
 - Transmission (Durchlass)
- Beugung
- Brechung
 - Übergang in anderes Medium
⇒ unterschiedl. Ausbreitungsgeschwindigkeiten

Schallausbreitung im Raum

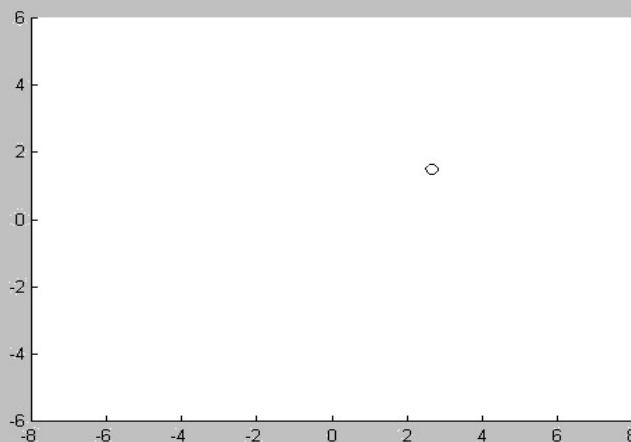
- Modell der Strahlverfolgung
- Modell mit Spiegelschallquellen
- Nachbildung des Schallfeldes mit WFS



Prof. Oliver Curdt

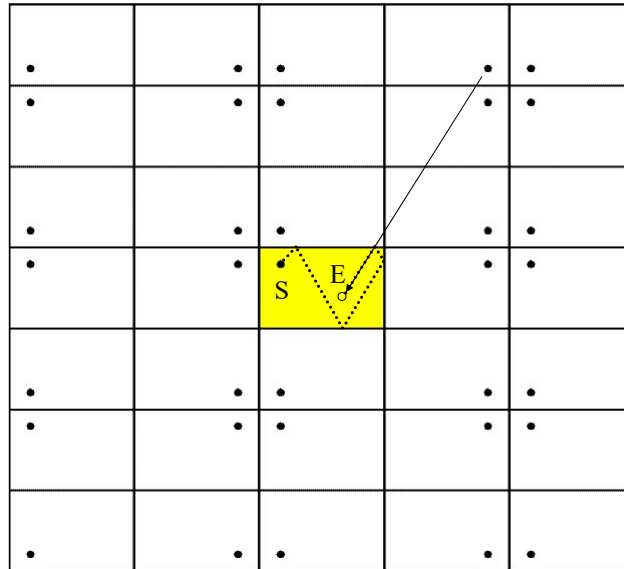
Kugelschallquelle im Rechteckraum ($\alpha = 0\%$) Impuls startet zur Zeit $t = 0$, Strahlverfolgung

$$r = c \cdot t,$$
$$c = 343 \text{ m/s}$$

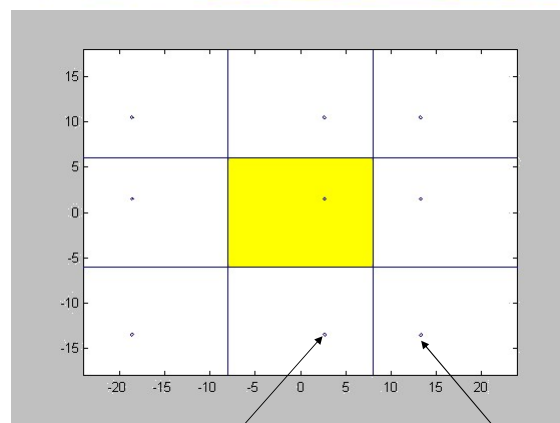


Prof. Oliver Curdt

Spiegelschallquellen im ebenen Rechteckraum



8 Spiegelschallquellen im ebenen Rechteckraum



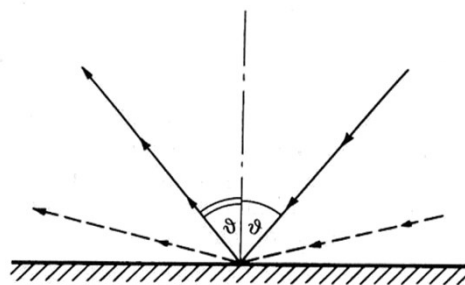
Prof. Oliver Curtt

Quelle 1.Ordnung

Quelle 2.Ordnung

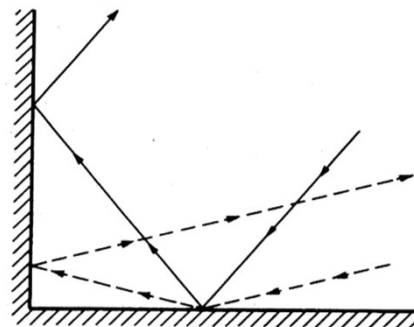
Reflexion an ebenen Flächen

- Reflexion bei hinreichend großer Fläche
 - Einfallswinkel gleich Ausfallswinkel
(\Rightarrow Wellencharakter)
 - Schallverlauf / Reflexionen beeinflussbar



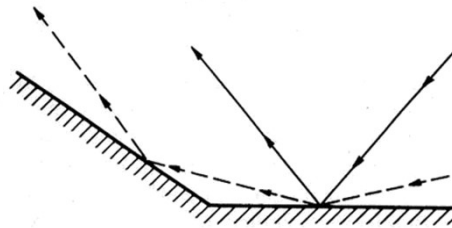
Reflexion an ebenen Flächen

- Reflexion an zwei senkrechten Wänden:
 - doppelte Reflexion
 - Einfalls- und Ausfallsrichtung stets genau entgegengesetzt
 - Effekt unabhängig vom Einfallswinkel



Reflexion an ebenen Flächen

- zwei Wände im stumpfen Winkel:
 - z. B. 6- oder 8-eckiger Raum
 - zwei Reflexionen nur bei flachem Einfallswinkel
 - Grenzfall, parallel
- ⇒ keine Reflexionen in Nähe der Winkelhalbierenden
- ⇒ Reflexionen hauptsächlich in Wandnähe



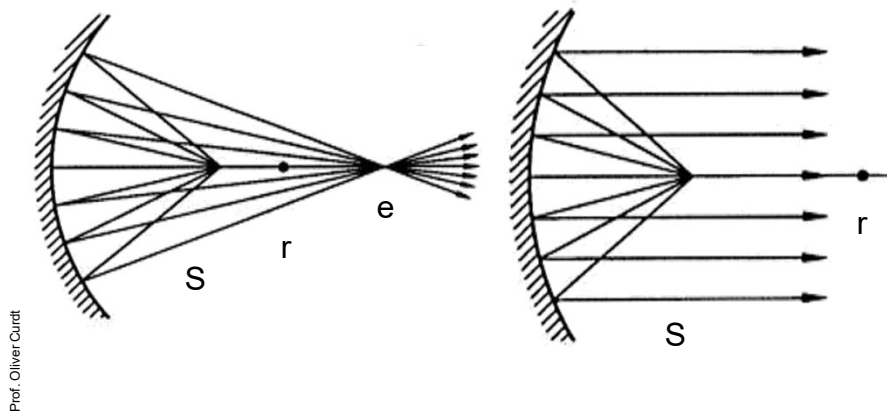
Prof. Oliver Curdt

Reflexion an gewölbten Flächen

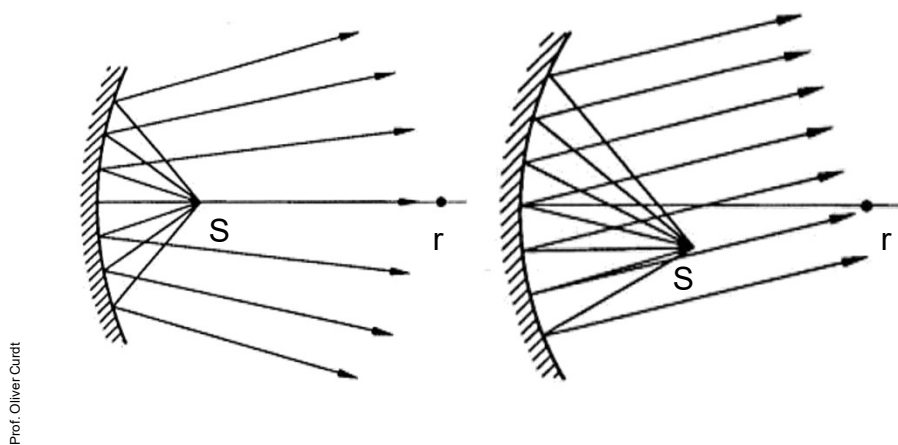
- gewölbte Wandflächen \triangleq optische Hohlspiegel
- Fokussierungseffekte
- schallzerstreuende Wirkungen
- $1/S + 1/e = 2/r$
 - S Abstand Sender-Wand
 - e Abstand Brennpunkt-Wand
 - r Krümmungsradius der Wand

Prof. Oliver Curdt

Reflexion an gewölbten Flächen



Reflexion an gewölbten Flächen



Reflexion an gewölbten Flächen

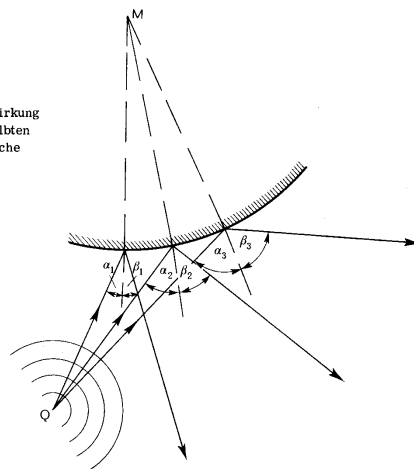
- ⇒ Gefahr von Inhomogenität an einzelnen Stellen im Raum durch Fokussierungen
- Balanceverschiebungen
- in Konzertsälen unerwünscht !!!
- nützlich für Sprachverständlichkeit in überakustischen Räumen (z. B. Kirchen)

Prof. Oliver Cürdt

Quelle: Jürgen Meyer, Kirchenakustik

Reflexion an gewölbten Flächen

Schallzerstreuende Wirkung
einer nach innen gewölbten
Wand- oder Deckenfläche



Prof. Oliver Cürdt

Einfluss der Wellenlänge

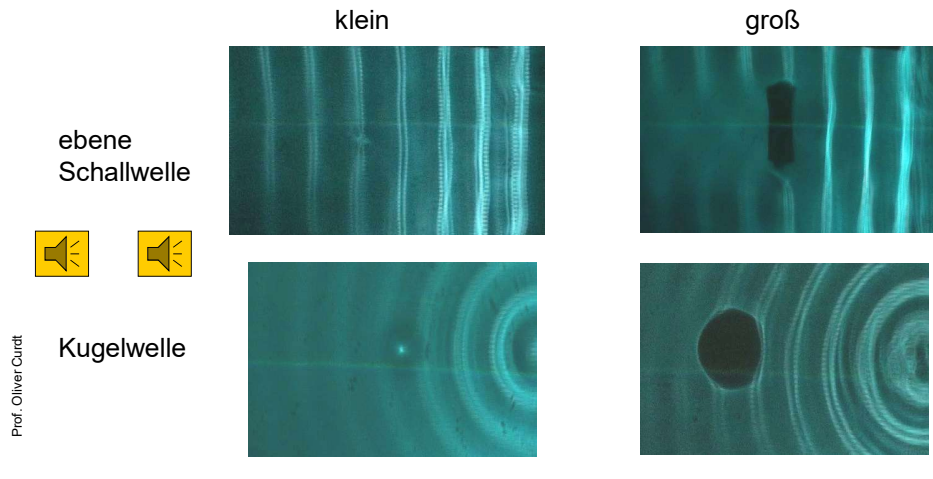
- Voraussetzung für Reflexion: hinreichend große Fläche bezogen auf die Wellenlänge
 - ⇒ mindestens mehrere Wellenlängen
 - ⇒ sonst Schallbeugung um das Hindernis bzw. Teilreflexion
- Wand mit Breite von 3 Wellenlängen:
 - ⇒ kurzer Schallschatten auf der Rückseite, fast vollständige Reflexion

Einfluss der Wellenlänge

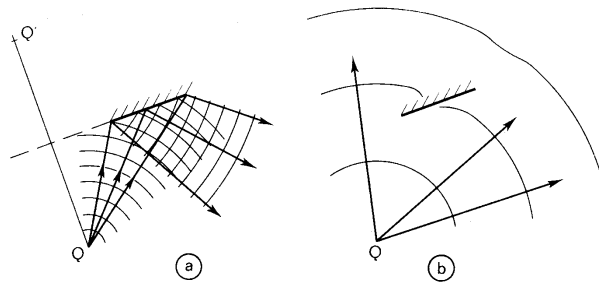
- Wand mit Breite von 1 Wellenlänge:
 - ⇒ sehr wenig Reflexion, fast vollständige Beugung um das Hindernis
- ⇒ akustische Wirkung von Reflektoren oder Hindernissen ist frequenzabhängig (tiefe f weit hörbar)

Einfluss der Wellenlänge

Hindernisse im Schallfeld im Vergleich mit der akustischen Wellenlänge



Einfluss der Wellenlänge



- Schallwellen beim Auftreffen auf eine kleine Reflexionsfläche,
- a) Schallanteile mit kurzen Wellenlängen, d.h. hohen Frequenzen, werden reflektiert,
 - b) Schallanteile mit großen Wellenlängen, also tiefen Frequenzen, werden gebeugt

Wirkungsbereich von Reflektoren

- reicht zu umso tieferen Frequenzen herab
 - je größer der Reflektor ist
 - je kleiner der Abstand zur Schallquelle ist
 - je kleiner der Abstand zum Hörer ist
 - je steiler der Schall auf den Reflektor auftrifft

Wirkungsbereich von Reflektoren

- hinreichende Masse für Wirkungsweise:
 - mittlere und hohe f (z. B. Sprache / Gesang):
 - ⇒ Flächengewicht 10 kg/m^2
 - ⇒ 12 mm starke Holzplatte
 - Bassregion (Musik):
 - ⇒ Flächengewicht 40 kg/m^2
 - ⇒ 50 mm starke Holzplatte

Reflektoren über der Bühne



Prof. Oliver Curdt

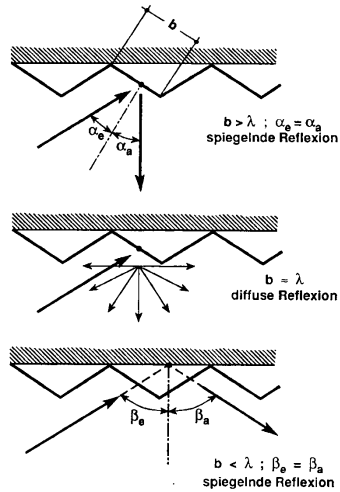
Wirkungsbereich von Reflektoren

- strukturierte Flächen mit Profil
 - glatte Wand für tiefe f (geometrische Mittelebene)
 - Einzelflächenreflexion für hohe f
 - Diffusreflexion für mittlere f
 - stärkste Diffusreflexion, wenn Tiefe der Struktur in Größenordnung $\frac{1}{4}$... $\frac{1}{2}$ Wellenlänge

- \Rightarrow Dreiteilung des Frequenzbereiches für zu unterschiedlicher Klangfärbung

Prof. Oliver Curdt

Reflexionen an strukturierten Flächen



Prof. Oliver Curtit

Reflexionsverhalten bei
verschiedenen Wellenlängen

hohe Frequenzen

mittlere Frequenzen

tiefe Frequenzen

Reflexionen an strukturierten Flächen



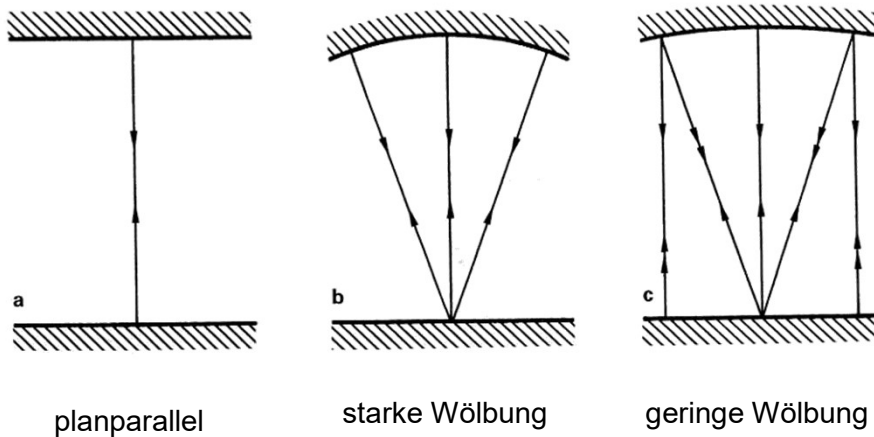
Prof. Oliver Curtit

Reflexionen an strukturierten Flächen



Prof. Oliver Curtt

Mehrfachreflexionen





Prof. Oliver Curtt

Wirkungsbereich von Reflektoren

- Impulsfolge bei stufenförmigen Strukturen

- \Rightarrow empfundene Tonhöhe, f entspricht $\frac{1}{2} \lambda$ der Tiefe der einzelnen Stufen

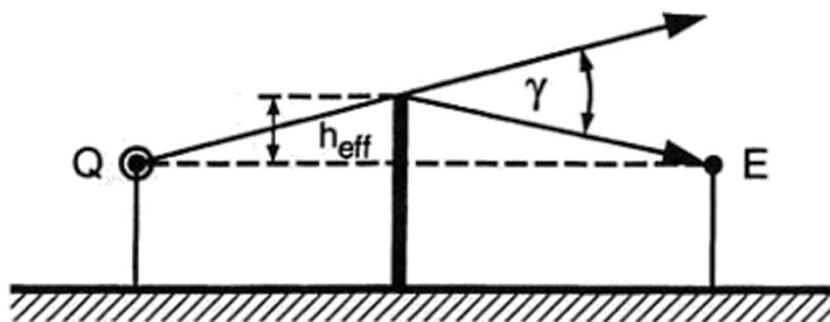
- Impuls  \Rightarrow Flatterecho 

Prof. Oliver Curdt

Quelle: Jürgen Meyer, Akustik und musikalische Aufführungspraxis

Einfluss einer Brüstung / Wand

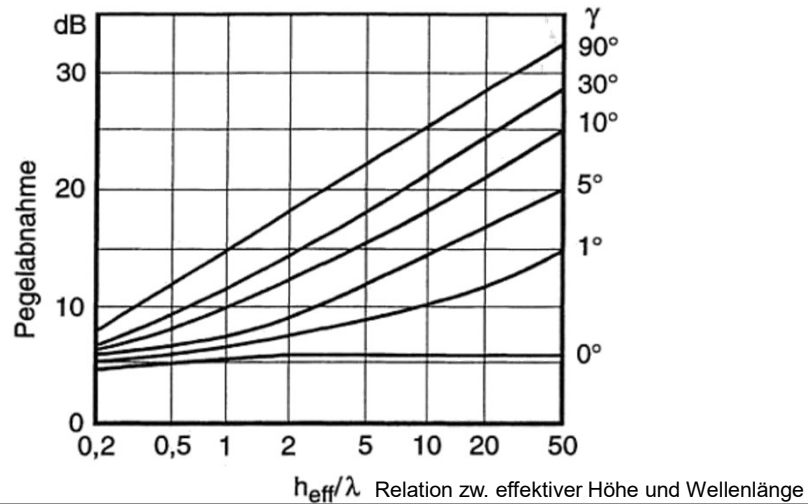
- abschattende Wirkung



Prof. Oliver Curdt

Einfluss einer Brüstung / Wand

Prof. Oliver Cürdt



Einfluss der Wellenlänge

- $0^\circ \Rightarrow 5 \dots 6$ dB Abschattung durch Energieumleitung, Beugung
- Stärke der Abschattung variiert
 - nur bei kleinen Winkeln sehr stark ($0^\circ \dots 10^\circ$)
 - relativ wenig im Bereich $10^\circ \dots 90^\circ$
- Anwendungsbeispiele:
 - Trennwände in Aufnahmerräumen
 - Schallschutzmauern
 - Orchestergraben in einem Opernhaus

Prof. Oliver Cürdt

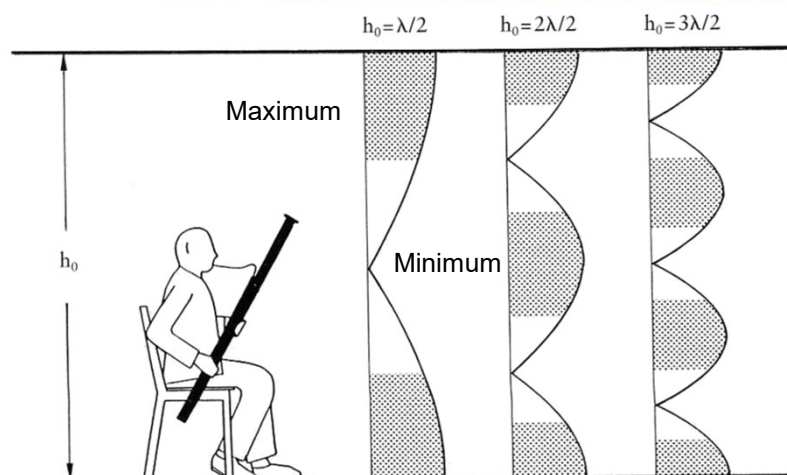
„Stehende“ Wellen

- Reflexion zwischen planparallelen Wänden
- Schallwellen werden in sich selbst zurückreflektiert
- Auslöschungen bzw. Addition wenn Wandabstand = $\frac{1}{2} \lambda \cdot n$ mit $n = 1, 2, 3, \dots$
 - \Rightarrow geringfügiges Verschieben des Mikrofons
- Minima, Maxima
- Flatterechos bei Impulsen

Prof. Oliver Curtt

Quelle: Jürgen Meyer, Kirchenakustik

„Stehende“ Wellen



Prof. Oliver Curtt

„Stehende“ Wellen

- Optimalmaße für Rechteckräume:
 - $h : b : t = 1 : 1,26 : 1,59$ oder $1 : 1,59 : 2,52$
⇒ entspricht etwa dem Schwingungsverhältnis einer Terz
 - $d = n \cdot \lambda / 2$; $c = \lambda \cdot f$; $d = n \cdot c / (2f)$
 - Raum 1 6,39 m x 4,02 m x 2,53 m
⇒ $n \cdot 27$ Hz $n \cdot 43$ Hz $n \cdot 68$ Hz
 - Raum 2 4,02 m x 4,02 m x 4,02 m
⇒ $n \cdot 43$ Hz $n \cdot 43$ Hz $n \cdot 43$ Hz
- ⇒ weniger Frequenzen aber mit stark erhöhtem Pegel !!!

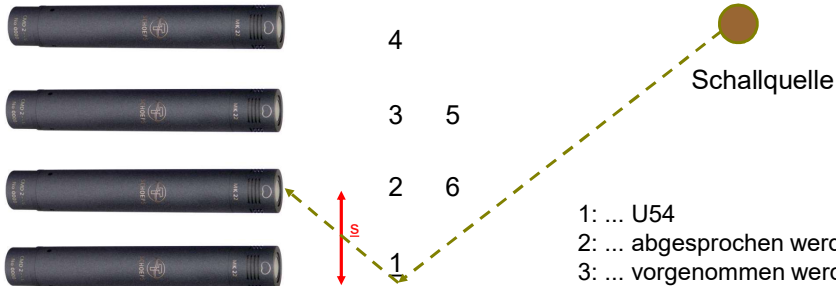
<https://trikustik.at/raummoden-rechner/>

Klangfärbung durch Kammfiltereffekt

- frühe, pegelstarke Reflexionen
(1 ... 15 ms nach Direktschall) bewirken
Verstärkungen und Auslöschungen im Frequenzgang

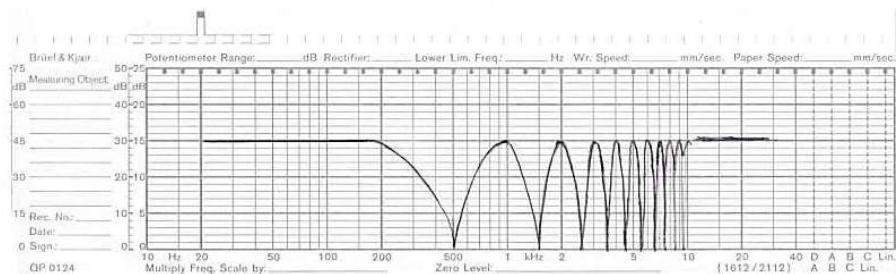
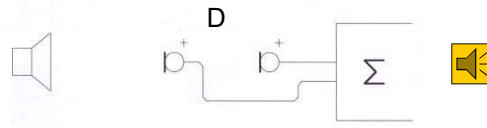
Kammfiltereffekt bei Sprache

Kammfiltereffekt, Grenzflächeneffekt



Prof. Oliver Curtt

Kammfiltereffekt



Prof. Oliver Curtt

D = 34 cm (13.2") 500 1500 Hz

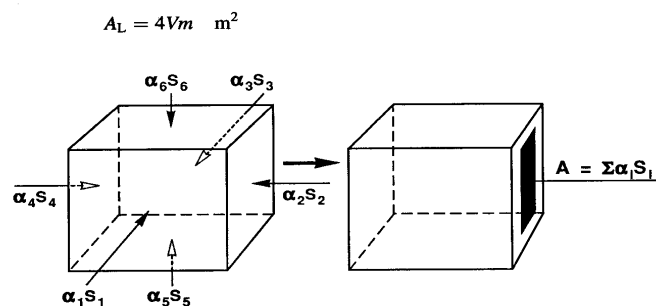
Absorption

- Dämpfung: Schallrückwürfe mit reduzierter Amplitude
 - \triangleq dunkle Flächen in der Optik mit wenig Reflexion
- $A = \alpha \cdot S$
- α Absorptions**grad** (\Rightarrow Leistung, Energie)
 - frequenzabhängig
 - Prozentsatz der absorbierten Energie
- A Absorptionsvermögen in m^2
 - „Schallschluckung“ einer Fläche oder deren Σ
 - Fläche für „offenes Fenster“
- S Größe der Fläche mit α

Prof. Oliver Curtit

Quelle: Dr. Ingolf Bork, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Labor 1.401

Äquivalente Absorptionsfläche



$A =$ Fläche eines offenen Fensters im total reflektierenden Raum

weitere Absorptionsursachen werden zu A addiert:

Einzelabsorber mit A_n z.B. einzelne Personen

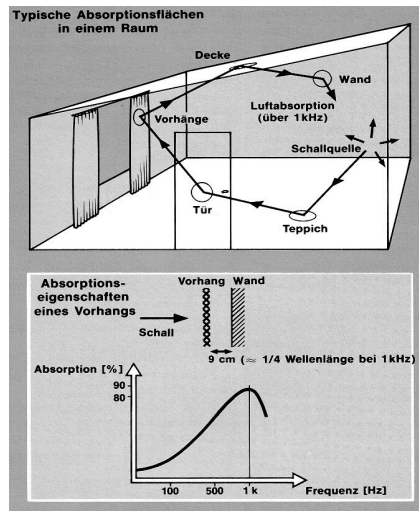
Ausbreitungsdämpfung in Luft A_L

m Energiedämpfungskonstante (in m^{-1})

$$T_{60} / s = 0,163 \cdot \frac{V / m^3}{A / m^2}$$

Prof. Oliver Curtit

Absorptionsflächen



Prof. Oliver Curdt

Absorption

- Vorhänge:
 - vorzugsweise Höhenabsorber
 - wirksam für alle f bei Wandabstand $> \frac{1}{4} \lambda$
 $\Rightarrow \frac{1}{4} \lambda + \frac{1}{4} \lambda = \frac{1}{2} \lambda$
 - schwerer Stoff nötig, ca. 300 g/m^2
 - Vorhang sollte in Falten hängen
 - $f_U = 8500 / d$ z. B. $f_U = 283 \text{ Hz}$ für $d = 30 \text{ cm}$
 - $\Rightarrow f_U$ untere Grenzfrequenz in Hz
 - $\Rightarrow d$ Wandabstand in cm

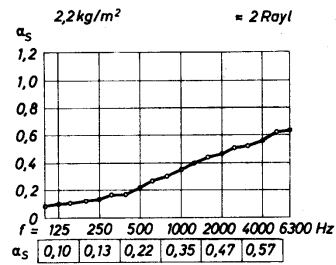
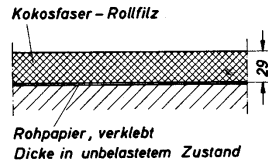
Prof. Oliver Curdt

Absorption

- Höhenabsorber: poröser Struktur (f_g)

Kokosfaser - Rollfilz a3.1-1

Prof. Oliver Curtt

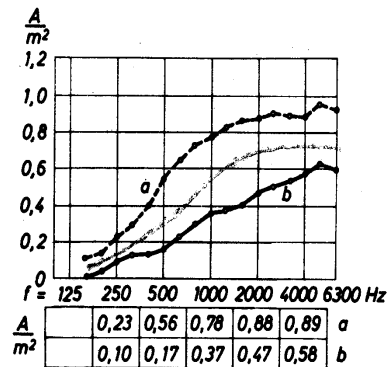


Absorption durch Personen

Einzelpersonen, sitzend m - 3

Prof. Oliver Curtt

Absorptionsfläche der Stühle ist zur Absorptionsfläche des Leerraums hinzugeschlagen.
Männliche Personen (a) im Anzug,
weibliche Personen (b) im Sommerkleid



Absorption

- Publikumsabsorption bei 1,5 Pers/m²

f in Hz	125	250	500	1000	2000	4000
α	0,2	0,4	0,8	0,85	0,95	0,9

- Schallausbreitung über Publikumsreihen hinweg
 - Höhe der Schallquelle \Rightarrow Bühnenhöhe
 - ansteigende Publikumsreihen
- Orgel: $\alpha \approx 0,55 \dots 0,6$ (125 ... 4000 Hz)

Absorption

- Publikum $f_g \approx 500$ Hz
 - besetzte Fläche wichtiger als Sitzdichte

Verteilung von 200 Personen auf eine Fläche von	Absorptionsvermögen bei 1000 Hz
100 m ²	95 m ²
200 m ²	140 m ²
300 m ²	165 m ²

Absorption

- gelegentlich $\alpha > 1$, d. h. $> 100\%$
- Gründe in der praktischen Anwendung:
 - wirksame Fläche eines Absorbers etwas größer als seine geometrische Fläche.
 - Kantenflächen fließen in die Berechnung des Absorptionsgrades zusätzlich zur Absorptionsleistung der Oberfläche

Absorption

- Tiefenabsorber: schwingungsfähige Platte vor Hohlraum (als Feder)
 - Feder-Masse-System
 - Helmholtzresonator
- Luft in der Öffnung: mitschwingende Masse
- Luft im Hohlraum: akustische Feder
- Hohe Energieentnahme bei Anregung der Resonanzfrequenz
→ schmalbandige Wirkung

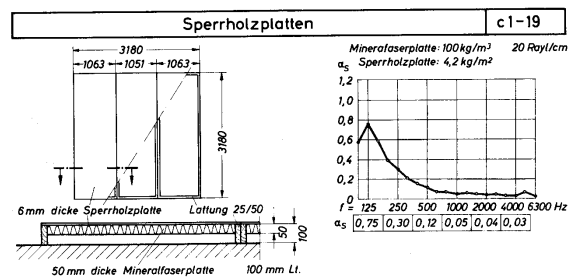
Absorption

- Tiefenabsorber:
 - reflektiert hohe f
 - Frequenzbereich max. Absorption desto tiefer
 - ⇒ je tiefer der Hohlraum
 - ⇒ je schwerer die Platte
- ⇒ noch besserer Wirkungsgrad, wenn Hohlraum mit Mineralfaserwolle bedämpft ist

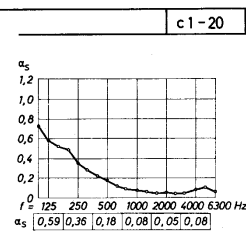
Prof. Oliver Curdtt

Quelle: Tabelle des Deutschen Normenausschusses (DNA)

Tiefenabsorber



Prüfanordnung wie c1-19, aber Luftraum vollständig mit Mineralfaserplatten ausgefüllt



Prof. Oliver Curdtt

Absorption

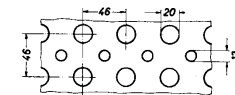
- Poröser Tiefenabsorber:
 - Positionierung idealerweise in Ecken von Räumen, weil dort am meisten Druckstau
→ Eckenabsorber, Bassfallen
 - große Materialdicke für $\frac{1}{4}$ Wellenlänge nötig

Absorption

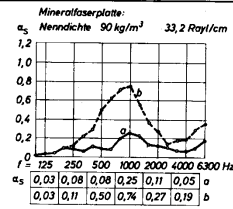
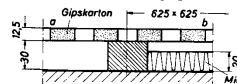
- Mittenabsorber:
 - höher abgestimmter Tiefenabsorber (250 ... 500 Hz)
 - dünne Platten
 - Hohlraum mit geringer Tiefe, durch Schlitze oder Löcher zum Raum hin geöffnet
⇒ Verkleinerung der schwingenden Masse

Mittensorber

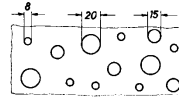
Gipskarton - Lochplatte **b 2.1-1**



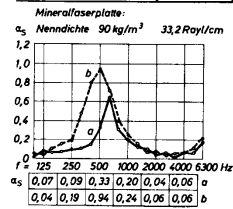
20,2% Lochflächenanteil
 a) ohne Hinterlegung
 b) mit Mineralfaser-Hinterlegung, Nennstärke 20mm



b 2.1-2

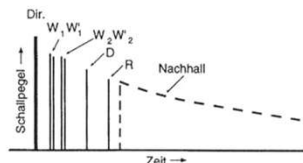
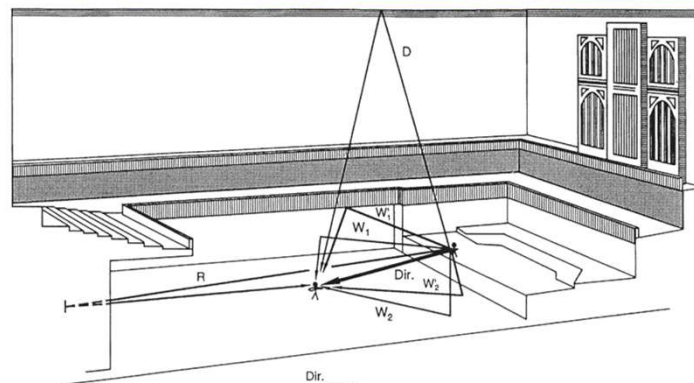


6% Lochflächenanteil
 Lochung unregelmäßig
 Aufbau der Prüffläche wie b 2.1-1
 a) ohne Hinterlegung
 b) mit Mineralfaser-Hinterlegung, Nennstärke 20 mm



Prof. Oliver Curtt

Nachhall im Raum



Prof. Oliver Curtt

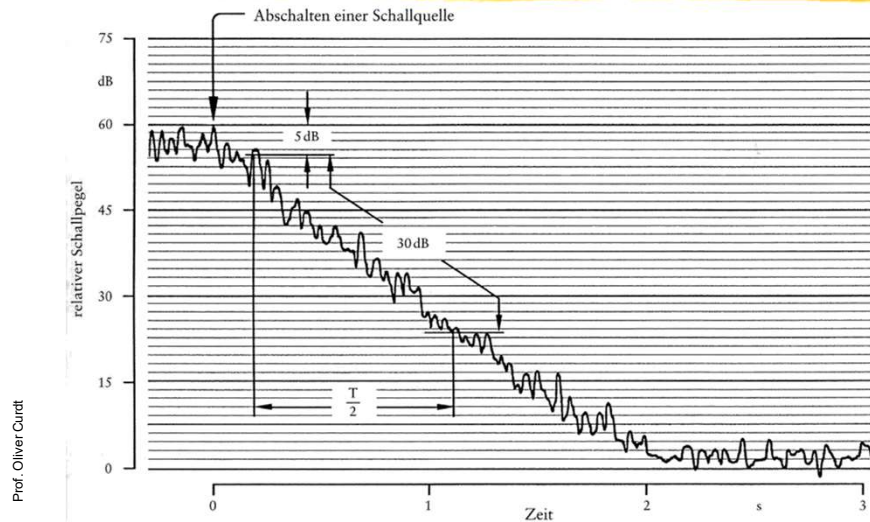
Nachhall

- Raumreaktion nach „Abschalten“ der Schallquelle
- Schallrückwürfe in zeitlich immer dichter werdender Folge
- Nachhalldauer (subjektiv), abh. von Ausgangs- und Störpegel, unabh. von Schallquelle

Nachhall

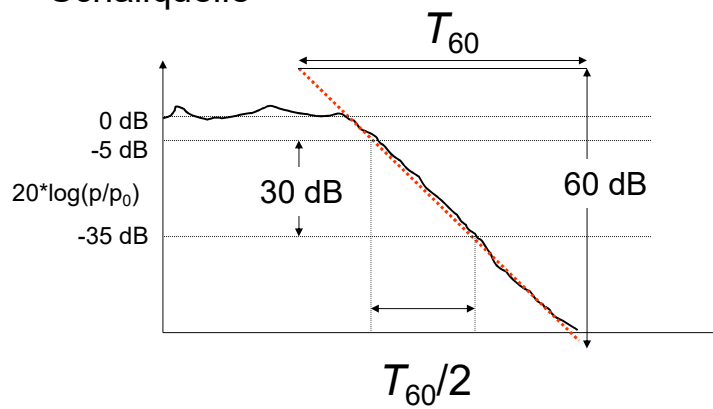
- „Sabinesche“ Nachhallzeit T_{60}
 - Wallace Clement Sabine (1868 – 1919), amerikanischer Physiker
 - - 60 dB gegenüber Anfangswert
⇒ Dynamik großes Orchester
- Nachhallzeit
 - Diffusschallfeld erforderlich
- Abklingzeit
 - relevant für kleine Räume

Nachhall



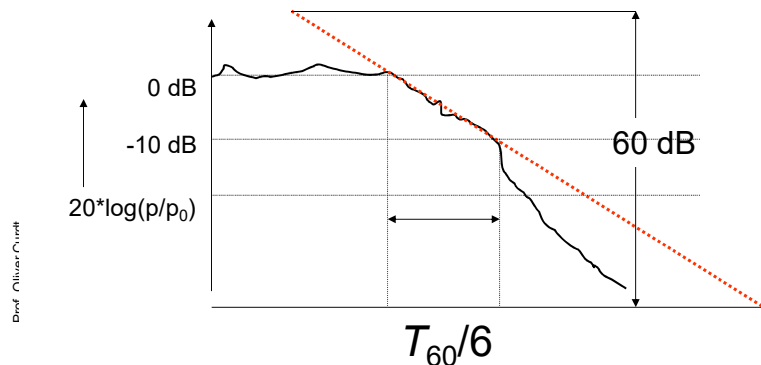
Nachhallzeiten

- T_{30} , Pegelverlauf nach Abschalten der Schallquelle



Nachhallzeiten, Early Decay Time

- Definition: Pegelabfall um 10 dB unmittelbar nach Abschalten der Quelle
- EDT, stärker ortsabhängig als T_{30}



Prof. Oliver Cürdt

Nachhall

- in der Praxis
 - 30 dB Pegelabfall ab 5 dB unter Maximum, Faktor 2
 - 10 dB Pegelabfall (Early Decay Time, EDT) für musikalische Feinstruktur
- Nachhallzeit abhängig von
 - Stärke der einzelnen Reflexionen
 - zeitlicher Abstand zwischen den einzelnen Reflexionsvorgängen („freie Weglängen“)
 - Frequenz, hohe f zusätzlich Dissipationsverluste während Schallausbreitung

Prof. Oliver Cürdt

Nachhall und Anhall

- grundsätzlich:
 - Frequenzabhängigkeit hat große Bedeutung für subjektiven Klangeindruck
 - ⇒ Klangfarbenänderung beim Ausklingen
 - ⇒ Anstieg von T_s bei tieferen f kommt dem menschlichen Gehör entgegen

- Einschwingzeit → Anhall eines Raumes (- 3 dB) < 1/20 Nachhallzeit

Nachhall

- Sabinesche Nachhallformel: $T = 0,163 \cdot V / A$
 - T in s, V in m^3 , A in m^2 (Σ der A-Werte aller Flächen)

- menschlichen Wahrnehmbarkeitsgrenzen:
 - etwa 0,02 s, bei $T < 0,8$ s
 - etwa 0,1 s, bei $T > 0,8$ s, dann etwas ansteigend

Beurteilungskriterien für Raumklang

- Nachhallzeit und Frequenzgang
- Bündelung
 - Fokussierung des Direktschalls auf die Zuhörer
- Diffusität
- Ruhegeräusch und Fremdgeräusche

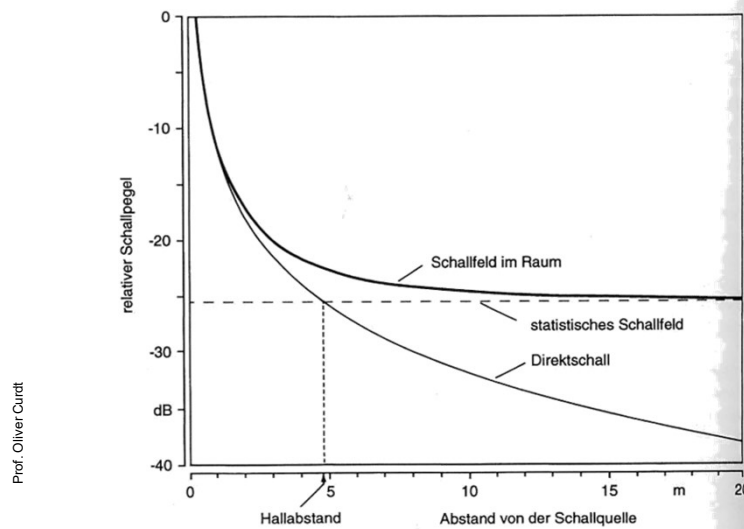
Prof. Oliver Curdt

Nachhallzeiten verschiedener Räume

- | | |
|---------------------------|--------------------------|
| ■ Sprecherstudio | 0,3 s |
| ■ Hörspielstudio | 0,3 ... 0,6 ... 1,2 s |
| ■ großes Fernsehstudio | 0,8 s |
| ■ Saal Sprache | 0,7 ... 1,2 s |
| ■ Oper | 1,5 s |
| ■ Konzertsaal (Orchester) | 2,0 s |
| ■ Kirchen | 2,5 ... 3,0 ... 12 ... s |

Prof. Oliver Curdt

Schallfeld



Hallradius / Hallabstand

■ Direktschall + statistisches Schallfeld
= Schallfeld im Raum

■ $r_H = 0,057 \cdot \Gamma_{st} \cdot \sqrt{(V / T)}$

- r_H Hallradius / Hallabstand in m
⇒ unabhängig von Leistung der Schallquelle
- Γ_{st} statistischer Richtfaktor der Schallquelle
- V Raumvolumen in m^3
- T Sabinesche Nachhallzeit in s

Hallradius / Hallabstand

- Hallradius = Hallabstand für $\Gamma_{st} = 1$
- ca. 5 ... 6 m als Größenordnung für Konzertsaal bei mittleren Frequenzen
- bei $3 \cdot r_H$ ist der Direktschall ca. 10 dB unter dem statistischen Schallfeld
 - ⇒ erste Wellenfront („Haas-Effekt“)
 - ⇒ Lokalisation noch möglich

Prof. Oliver Curdt

Quelle: Jürgen Meyer, Akustik und musikalische Aufführungspraxis

Hallradius / Hallabstand

- Hallabstand für Trompete im Konzertsaal:

Frequenz	frontaler Abstand	max. seitl. Ausdehnung
500 Hz	5 m	10 m
2 kHz	12 m	12 m
10 kHz	38 m	18 m



Prof. Oliver Curdt

1. Beispielrechnung für T_{60}

■ Regieraum: $6,39 \text{ m} \cdot 4,02 \text{ m} \cdot 2,53 \text{ m}$

$$\Rightarrow V = 65 \text{ m}^3$$

■ Holzdecke $\alpha = 0,03$; $S = 6,39 \text{ m} \cdot 4,02 \text{ m} = 25,7 \text{ m}^2$

■ Linoleumboden $\alpha = 0,03$; $S = 25,7 \text{ m}^2$

■ Tapete $\alpha = 0,1$

$$S = 2 \cdot (6,39 \text{ m} + 4,02 \text{ m}) \cdot 2,53 \text{ m} = 52,7 \text{ m}^2$$

$$\Rightarrow \text{Nachhallzeit } T_{60} = 1,55 \text{ s}$$

$$\Rightarrow \text{Hallradius } r_H = 0,37 \text{ m}$$

2. Beispielrechnung für T_{60}

■ modifizierter Regieraum: $6,39 \text{ m} \cdot 4,02 \text{ m} \cdot 2,53 \text{ m}$

$$\Rightarrow V = 65 \text{ m}^3$$

■ Deckenplatten $\alpha = 0,6$; $S = 25,7 \text{ m}^2$

■ Teppichboden, schwer $\alpha = 0,2$; $S = 25,7 \text{ m}^2$

■ Wandplatten $\alpha = 0,4$; $S = 52,7 \text{ m}^2$

$$\Rightarrow \text{Nachhallzeit } T_{60} = 0,25 \text{ s}$$

$$\Rightarrow \text{Hallradius } r_H = 0,92 \text{ m}$$

Zeitlicher Aufbau des Schallfeldes

- Direktschall:
 - Deutlichkeit (z. B. Sprache, schnelle Tonfolgen)
 - Durchsichtigkeit des Klangbildes
 - räumliche Aufstellung der Musiker, 1. Wellenfront
 - Lokalisation
 - Entfernungseindruck

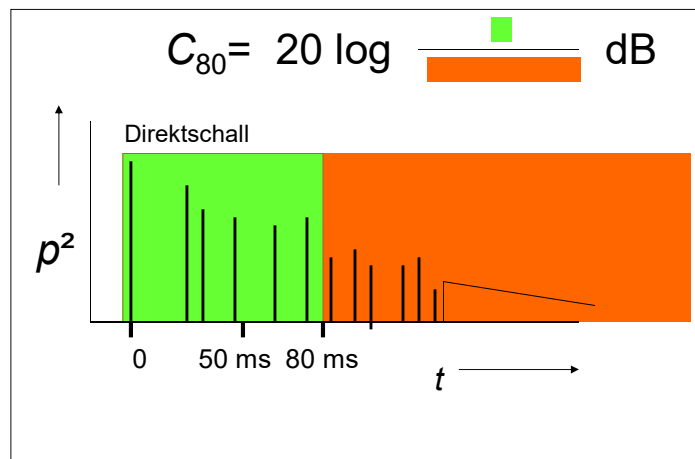
Prof. Oliver Cürdt

Zeitlicher Aufbau des Schallfeldes

- verzögerte Reflexionen:
 - Σ = Nachhall
 - Verschmelzen zu einem Gesamtklang
 - Überbrückung von Lücken in zeitlichen Abläufen
 - Erhöhung des Lautstärkeindrucks
 - Bedeutung der ersten Reflexionen (Zeit, Richtung)
 - „Haas-Effekt“ ... 10 dB Pegeldifferenz ausgleichbar !!!

Prof. Oliver Cürdt

Klarheitsmaß (Clarity, Musik)



Prof. Oliver Curtit

Zeitlicher Aufbau des Schallfeldes

■ Klarheitsmaß $C_{80} = 20 \lg \{E_{80}/(E_{\infty} - E_{80})\}$ dB

- E_{∞} gesamte eintreffende Schallenergie
- E_{80} eintreffende Schallenergie von 0 ... 80 ms
- Anwendung bei Musik
- üblicher Wert - 2 ... + 4 dB (Konzertsaal)

Prof. Oliver Curtit

Zeitlicher Aufbau des Schallfeldes

- Deutlichkeitsmaß $D_{50} = E_{50} / E_{\infty}$ in %
 - Anwendung Sprache
- Relationen beachten !!!
 - Horizontalebene („interaurale Korrelation“)
 - Vertikalebene (Verstärkung, keine räuml. Wirkung)
 - fließende Übergänge
 - guter Höreindruck, wenn erste Seitenreflexion **vor** der ersten Deckenreflexion beim Zuhörer eintrifft

Prof. Oliver Curdt

„Räumlichkeit“

- subjektive Empfindung:
 - räumliche Ausweitung des Klages zur Seite und nach oben
 - erweiterter Raumbereich wirkt „schallerfüllt“ ohne Beeinträchtigung der Lokalisation
 - Voraussetzung: hinreichende Lautstärke
 - ⇒ *piano* – Stellen auch in mittelmäßigen Sälen gut
 - ⇒ überzeugende Klangentfaltung im *forte* nur in akustisch guten Sälen (emotionales Erlebnis)
 - Seitenschallmaß

Prof. Oliver Curdt

Quelle: Jürgen Meyer, Akustik und musikalische Aufführungspraxis



Historische Konzertsäle

Umfrage von 1950-1955	Bj	Volumen	Zuhörer- plätze	Nachhallzeit, voll besetzt, 500 ... 1000 Hz
Großer Wiener Musikvereinssaal	1870	14600 m ³	1680	$T_m = 2,05$ s $T_t = 2,4$ s
Theatro Colon, Buenos Aires	1908	20500 m ³	2490	$T_m = 1,8$ s
Concertgebouw Amsterdam	1887	18700 m ³	2200	$T_m = 2,0$ s $T_t = 2,2$ s
Symphony Hall, Boston	1900	18750 m ³	2630	$T_m = 1,8$ s $T_t = 2,2$ s
Konzerthus Göteborg	1935	11900 m ³	1370	$T_m = 1,7$ s $T_t = 1,9$ s

Prof. Oliver Cürdt

Quelle: Jürgen Meyer, Akustik und musikalische Aufführungspraxis



„Neue“ Konzertsäle

	Bj	Volumen	Zuhörer- plätze	Nachhallzeit, voll besetzt, 500 ... 1000 Hz
Royal Festival Hall London	1951	22000 m ³	3000	$T_m = 1,45$ s $T_t = 1,35$ s
Liederhalle Stuttgart	1956	16000 m ³	2000	$T_m = 1,65$ s $T_t = 1,8$ s
Beethovenhalle Bonn	1959	15700 m ³	1410	$T_m = 1,7$ s $T_t = 2,0$ s
Philharmonie Berlin	1963	26000 m ³	2220	$T_m = 2,0$ s $T_t = 2,4$ s
Meistersingerhalle Nürnberg	1963	23000 m ³	2000	$T_m = 2,05$ s $T_t = 2,2$ s

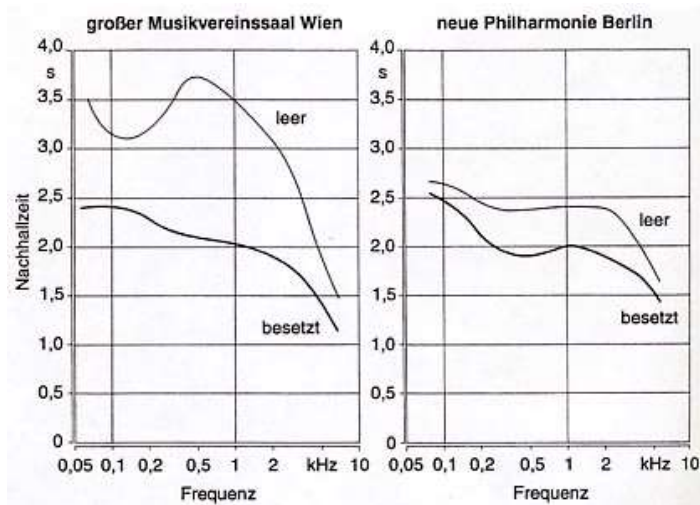
Prof. Oliver Cürdt

„Neue“ Konzertsäle

	Bj	Volumen	Zuhörer- plätze	Nachhallzeit, voll besetzt, 500 ... 1000 Hz
„Neues“ Gewand- haus Leipzig	1981	21560 m ³	1905	$T_m = 2,0$ s $T_t = 2,0$ s
Alte Oper Frankfurt	1981	22200 m ³	2350	$T_m = 1,95$ s $T_t = 1,55$ s !!!
Schauspielhaus Berlin	1984	15000 m ³	1675	$T_m = 2,0$ s $T_t = 2,2$ s
Gasteig München	1985	30000 m ³	2500	$T_m = 1,9$ s $T_t = 1,9$ s
Philharmonie Köln	1986	21000 m ³	2000	$T_m = 1,65$ s $T_t = 2,0$ s

Prof. Oliver Curtt

Konzertsäle



Prof. Oliver Curtt

Konzertsäle

- optimale Nachhallzeit für Orchester $\approx 2,0$ s
- optimale Nachhallzeit für Orgel $\approx 4 \dots 5$ s
- Hallradius für Kugelschallquelle $\Gamma_{st} = 1$
 - $r_H = 0,057 \cdot \Gamma_{st} \cdot \sqrt{V / T}$
 - \Rightarrow Wiener Musikvereinssaal: 4,75 m
 - \Rightarrow Berliner Philharmonie: 6,50 m

Prof. Oliver Cürdt

Weitere Aufführungsorte

- Opernhäuser
- Kirchen
- Kammermusikräume
- Studioräume
- Spezialräume
- Freiluftbühnen
- antikes griechisches Theater

Prof. Oliver Cürdt

Tempo und Nachhall

- Nachhall länger als optimal:
 - mehr Fülle weniger Deutlichkeit
 - schnelle Sätze langsamer
 - langsame Sätze langsamer

 - Nachhall kürzer als optimal:
 - schnelle Sätze langsamer
 - langsame Sätze schneller
- ⇒ Verlust der Temporelation !!!

Prof. Oliver Curdt

Tempo und Nachhall

- künstlicher Nachhall bei Aufnahmen

- Einfluss von Monitoring und Beschallung

- schnelleres / langsames Tempo nicht durch Timetwist ausgleichbar !!!
 - ⇒ rhythmische Feinstruktur maßgeblich !!!

Prof. Oliver Curdt