

Tontechnisches Praktikum

Schallfeldgrößen / Grundlagen der Schallausbreitung

Was ist Schall?

Mal ganz einfach: Schall ist bewegte Luft.

Etwas genauer:

Schall ist eine zeitlich beliebige mechanische Zustandsänderung elastischer Medien (nicht nur Luft!).

Hervorgerufen wird diese Änderung durch die auf das Medium wirkende Kräfte eines angeschlossenen Erregers (Schallquelle).

**Luftschall ist eine dynamische Luftvolumen-Änderung, der eine entsprechende Luftdruckänderung umgekehrt proportional ist.
???**

(in Annäherung: sich einen platzenden Luftballon vorstellen).

Tontechnisches Praktikum

Schallfeldgrößen / Grundlagen der Schallausbreitung

BOYLE-MARIOTTESche Gesetz:

das Produkt aus dem Volumen V und dem Druck p einer Gasmenge ist bei gleichbleibender Temperatur konstant.

Da bei Luftschall die Druckänderungen sehr rasch vor sich gehen, werden die resultierenden Lufttemperaturänderungen jedoch nicht mit der Umgebung ausgeglichen. In diesem Fall gilt das adiabatische Gasgesetz:

$$p \cdot V^\gamma = \text{const}$$

Tontechnisches Praktikum

Schallfeldgrößen / Grundlagen der Schallausbreitung

® wichtige Schallfeldgröße:

Schalldruck p

Einheit: $1 Pa$ (Pascal) = $1 N/m^2$

Beispiele Größenordnungen:

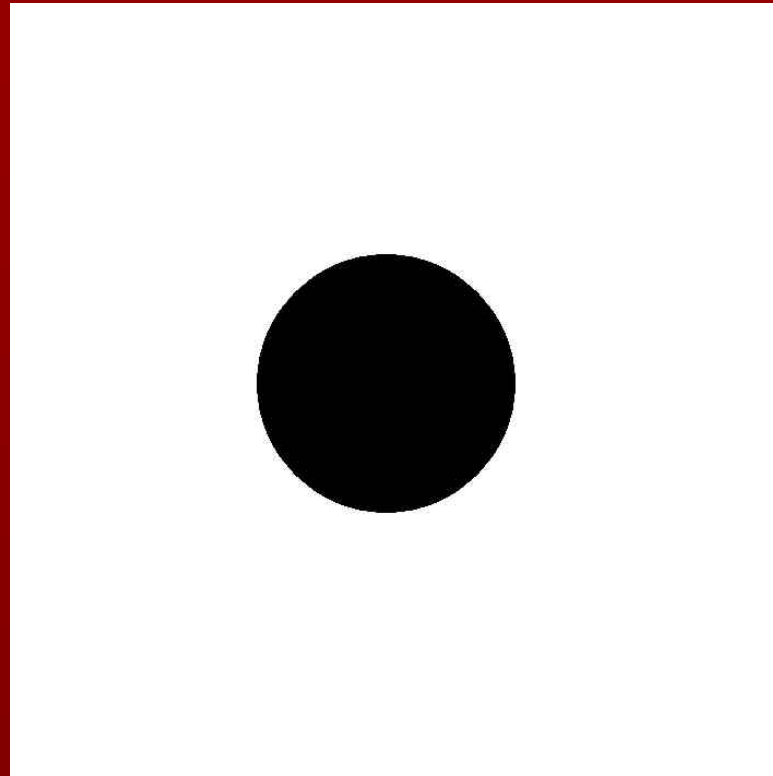
- Schalldruckveränderung durch Sprechstimme in 1m Entfernung: ca $0,1 Pa$
- Fortissimo-Klang eines Sinfonieorchesters beim Dirigenten: $1 - 2 Pa$
- statischer atmosphärischer Luftdruck: ca. $100000 Pa$

$$p \cdot V^{\gamma} = \text{const}$$

$\gamma = 1,4$: interessant für
Quellschalldruck $> 0,65 Pa$

Tontechnisches Praktikum

Schallfeldgrößen / Grundlagen der Schallausbreitung



Schallausbreitung: „atmender“ Kugelstrahler als Erreger

® etwas genauer

Tontechnisches Praktikum

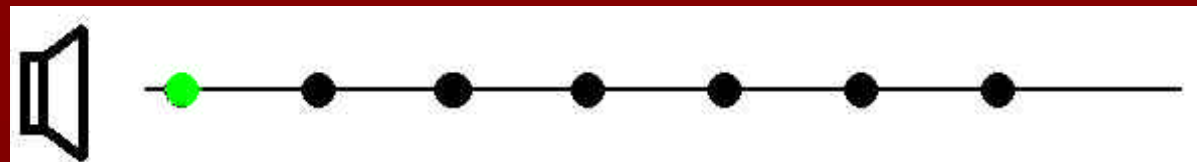
Schallfeldgrößen / Grundlagen der Schallausbreitung

Ungestörte Ausbreitung von Schall in Luft

Modell: man betrachte bildlich (Modell!!) einzelne Luftteilchen (ähnlich Moleküle).

Dann „fliegen“ nicht die einzelnen Teilchen durch den Raum, sondern ihr Bewegungszustand pflanzt sich fort.

® elastische Verbindung der einzelnen Teilchen.



Ausbreitungsgeschwindigkeit

↔
Bewegungsgeschwindigkeit eines Teilchens

Tontechnisches Praktikum

Schallfeldgrößen / Grundlagen der Schallausbreitung

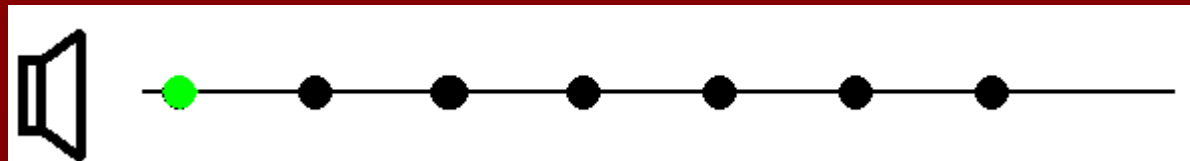
Ungestörte Ausbreitung von Schall in Luft

Bewegungsgeschwindigkeit eines Teilchens ¹

Ausbreitungsgeschwindigkeit von Schall

Bewegungsgeschwindigkeit ist auch eine wichtige Schallfeldgröße:

Schallschnelle v



Bewegungsgeschwindigkeit eines Teilchens

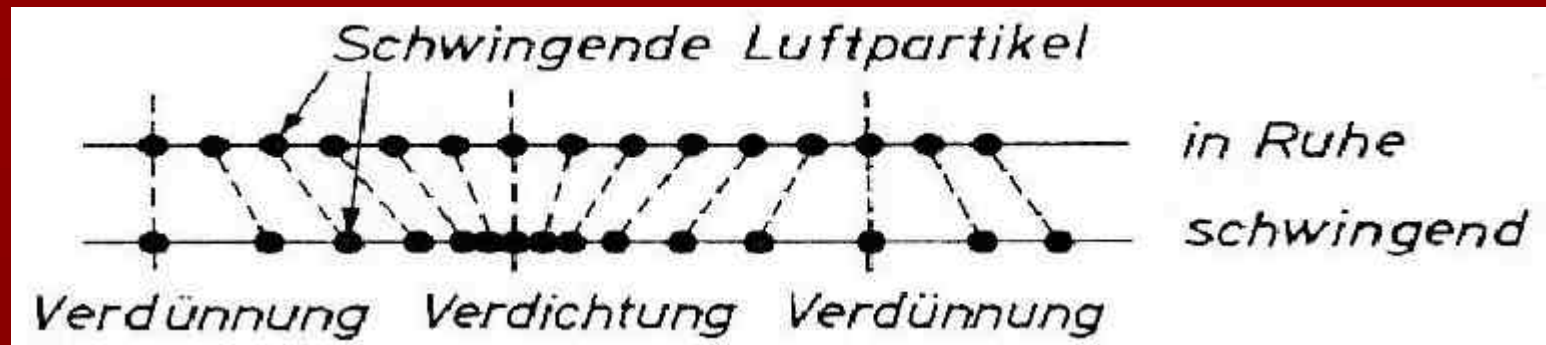
Ausbreitungsgeschwindigkeit?

Tontechnisches Praktikum

Schallfeldgrößen / Grundlagen der Schallausbreitung

Ungestörte Ausbreitung von Schall in Luft

Es entstehen Zonen mit Verdichtung und Verdünnung von Teilchen:



Diese entsprechen Zonen mit höherem und niedrigerem Luftdruck.

Die Druckunterschiede gleichen sich zeitlich und räumlich wieder aus.

® Ausbreitung mit nach und nach verringerter Amplitude

Ausbreitungsgeschwindigkeit = Schallgeschwindigkeit $c \approx 343 \text{ m/s}$
(Luft bei 20 °C)

Tontechnisches Praktikum

Schallfeldgrößen / Grundlagen der Schallausbreitung

Schallwellen

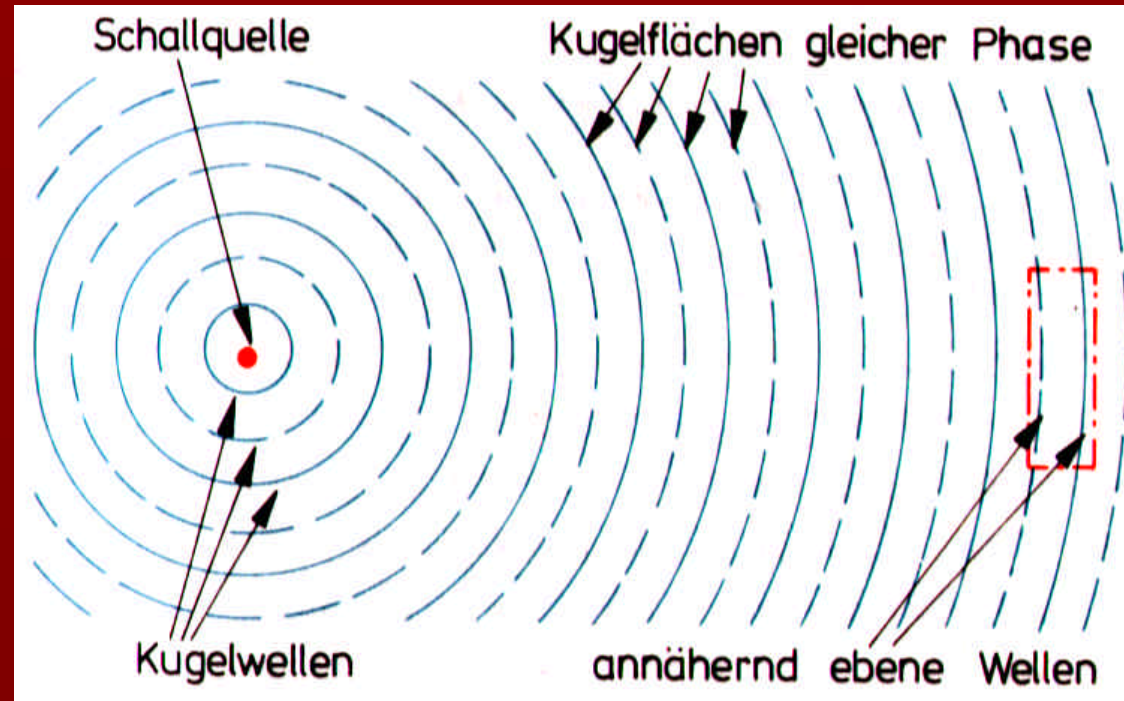
Welle: Fortpflanzung einer zeitlich und räumlich periodischen Schwingung.

Schallwellen in Gasen und Flüssigkeiten sind immer Longitudinalwellen.
(Schwingungsrichtung eines Teilchens entspricht Ausbreitungsrichtung)

Kugelwelle / Ebene Welle:

Ebene Wellen treten dann annähernd auf, wenn Wellenlänge \ll Entfernung zur Schallquelle.

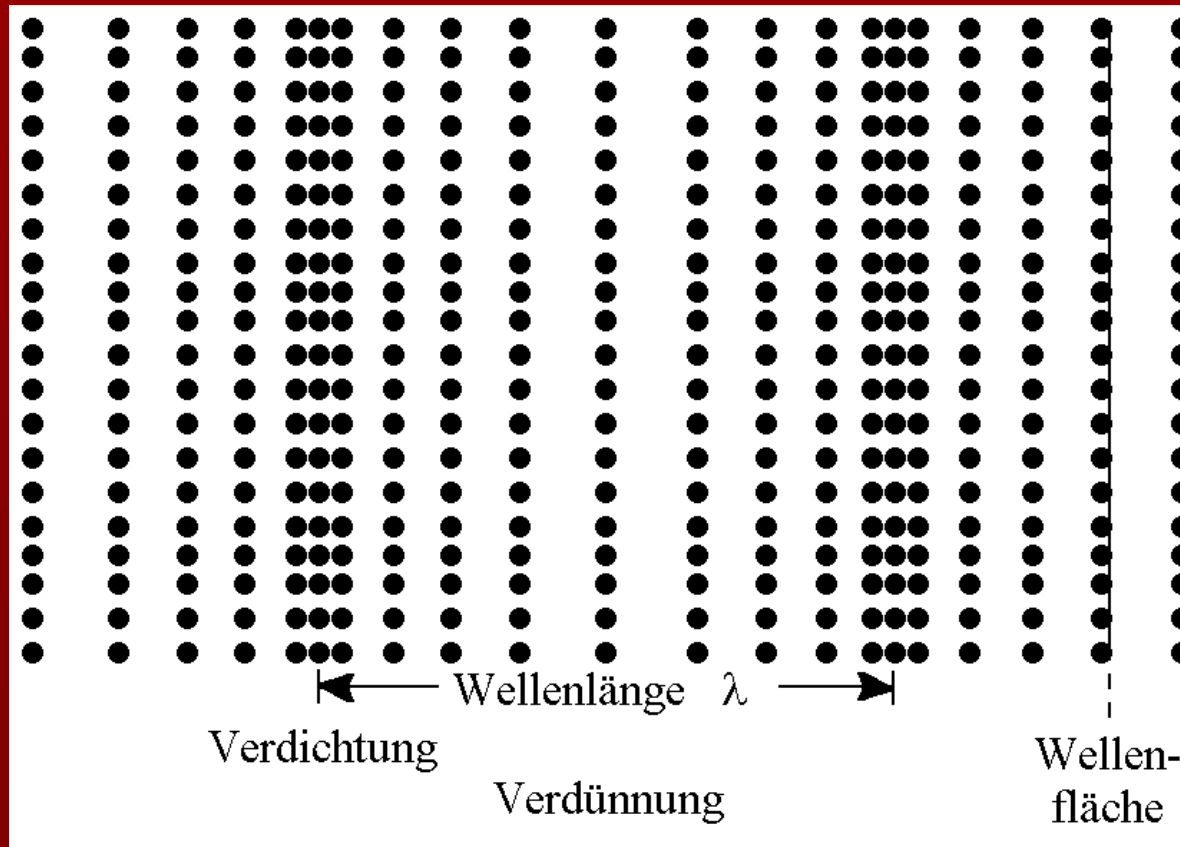
Wellenlänge??



Tontechnisches Praktikum

Schallfeldgrößen / Grundlagen der Schallausbreitung

Schallwellen



Wellenlänge λ :
der kleinste Abstand in
Ausbreitungsrichtung
zwischen zwei Teilchen
mit gleichem
Schwingungszustand

Frequenz f :
Anzahl der gleichen
Schwingungszustände
eines Teilchens pro
Sekunde

$$f = c / \lambda$$

$f = 16 - 20000 \text{ Hz}$: hörbarer Schall (?)

$f < 16 \text{ Hz}$: Infraschall $f > 20 \text{ kHz}$: Ultraschall

$[f] = 1/s = \text{Hz}$ (Herz)

Tontechnisches Praktikum

Schallfeldgrößen / Grundlagen der Schallausbreitung

Schallwellen

Wellenlänge λ (Luft) in m	Frequenz f in Hz
21,4	16 (Subkontra C)
17,2	20
6,86	50
3,43	100
0,343	1000
0,0343	10000
0,0214	16000
0,0172	20000

$$f = c / \lambda$$

Tontechnisches Praktikum

Schallfeldgrößen / Grundlagen der Schallausbreitung

Weitere Schallfeldgrößen

Wir hatten (primäre Größen):

- Schalldruck p
 - Schallschnelle v
- } Entfernungsabhängig!

Neu (sekundäre Größen):

- Schallintensität $J = \rho \cdot v$ (braucht man in der TST nicht, taucht aber in Lit. auf)
- Schallenergiedichte $E = J / c$ (braucht man in der TST nicht)
- Schalleistung $P = J \cdot A$ A : Fläche Entfernungsunabhängig!

In der Tonstudioteknik wird neben Schalldruck und -Schnelle nur noch die Schalleistung bei Beschallungsaufgaben benötigt. $[P] = W$ (Watt)

Anschaulich ist dies die Schallenergie, die zu einer bestimmten Zeit durch eine bestimmte Fläche hindurchströmt. Größenordnungen (ca.):

Stimme max: 0,002 W; Trompete: 0,3 W; Orchester: 70 W; Hifilautsprecher: 10 W

Tontechnisches Praktikum

Schallfeldgrößen / Grundlagen der Schallausbreitung

Entfernungsabhängigkeit

Fernfeld $l \ll r$:

$$p \sim v \sim 1 / r$$

Schalldruck und Schallschnelle sind hier stets in Phase

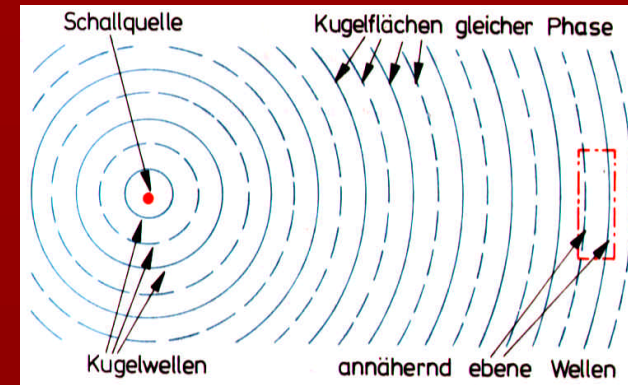
Nahfeld $l \approx r$:

$$p \sim 1 / r \quad v \sim 1 / r^2$$

Zw. Druck und Schnelle besteht ein frequenz- und entfernungsabh. Phasenversatz (bedingt durch Blindanteil der „mitschwingenden Mediummasse“, die energielos verschoben wird, ohne komprimiert zu werden.)

Diffusfeld:

Schall (neben Direktschall von der Schallquelle vor allem Rückwürfe durch einen Raum) treffen mit Gleichverteilung (diffus) auf einen Punkt im Raum (z.B. Hörer) ein (nahezu ideales Diffusfeld ergibt sich nur in einem großen gekachelten Hallraum).



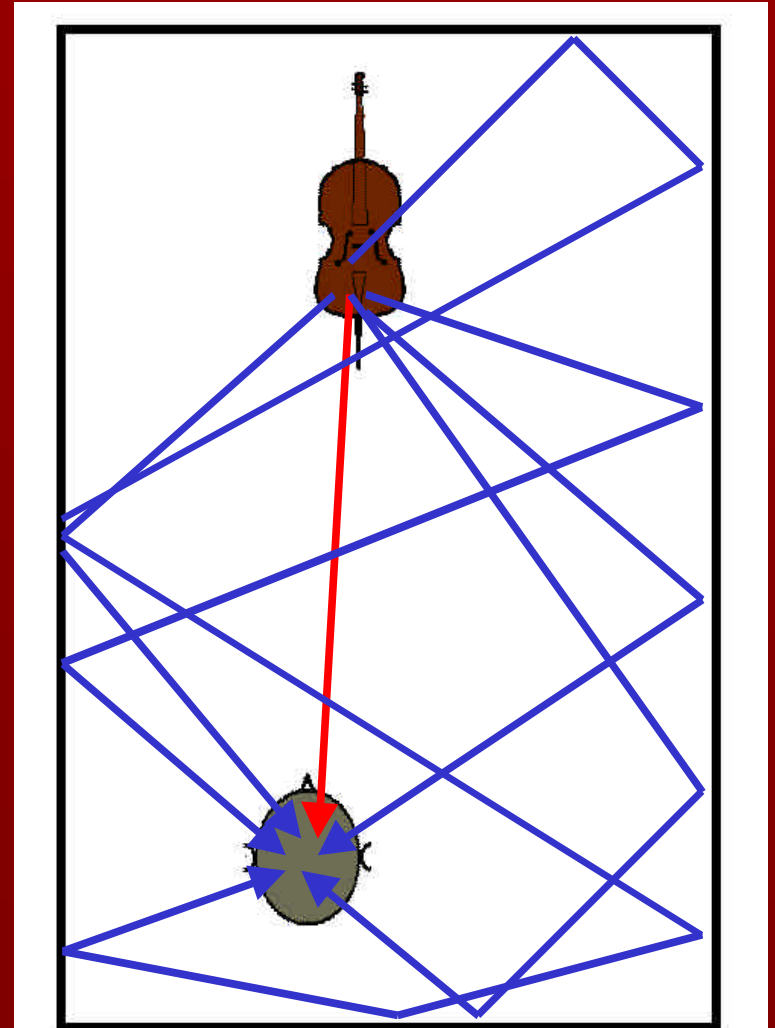
Tontechnisches Praktikum

Schallfeldgrößen / Grundlagen der Schallausbreitung

Schallausbreitung in Räumen:

In Räumen wird Schall von einer Schallquelle verlustbehaftet (s.u.) reflektiert.

Geometrische Betrachtung:
Einfallswinkel = Ausfallswinkel



Tontechnisches Praktikum

Schallfeldgrößen / Grundlagen der Schallausbreitung



Schallausbreitung in Räumen:

Dasselbe erst noch wellentheoretisch:
Kugelwelle vom Instrument

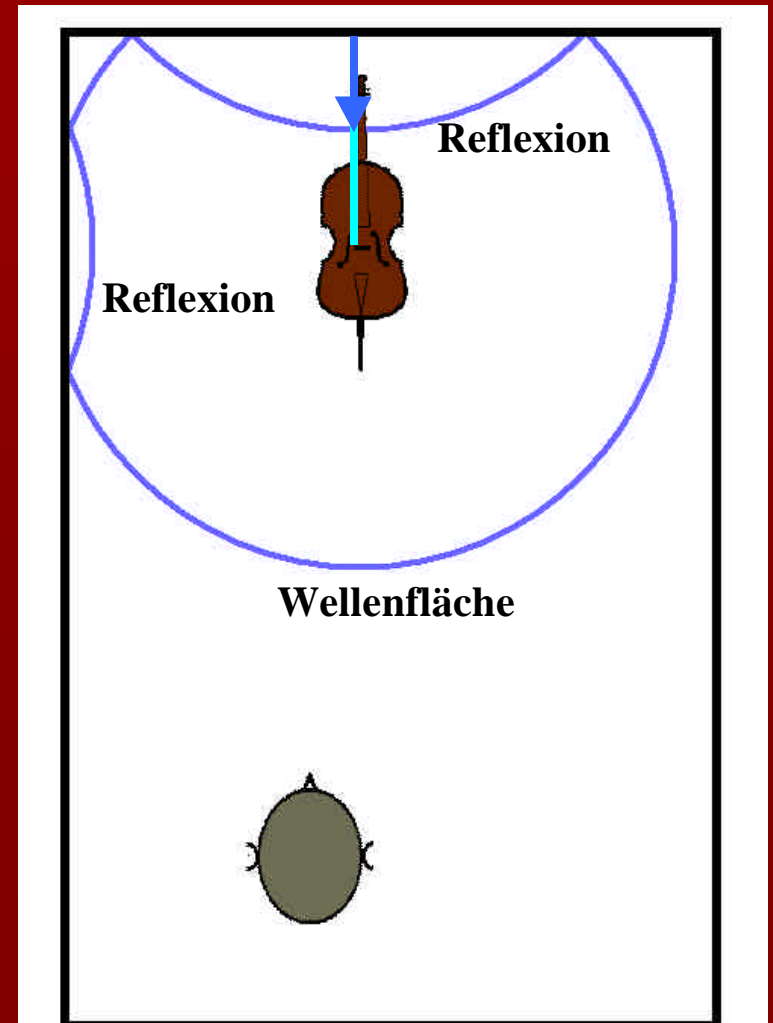
Einfallswinkel = Ausfallswinkel
(vektorielle Addition; HUYGHENSsche Prinzip)

Sich vorstellen:

Wellenfläche werden an Begrenzungs-
flächen „umgeklappt“, oder

Spiegelschallquelle hinter Begrenzungs-
fläche

Direktschall und Reflektierter Schall über-
lagern sich (Interferenz) ® Ausbildung von
Resonanzen (Raummoden, stehende
Wellen) im eingeschwungenen Zustand



Tontechnisches Praktikum

Schallfeldgrößen / Grundlagen der Schallausbreitung

Schallausbreitung in Räumen

Verlustbehaftet: nach dem Direktschall treffen nach und nach mit abnehmender Amplitude Reflexionen auf einen Hörer ein.

Diese Abnahme entsteht durch den Druckausgleich in Luft und durch Reibungseffekte an den Wänden: Schallenergie wird durch Poren im Wandmaterial in Wärme umgewandelt. (Absorption. Für Akustiker: Schalldämmung ¹ Schalldämpfung).

Der Anteil des reflektierten Schalls ist frequenzabhängig und abhängig vom Wandmaterial.

**Reflexionsgrad $J = P_r / P_e$ Absorptionsgrad $\alpha = 1 - P_r / P_e$
(eher interessant in der Akustik als in der TST)**

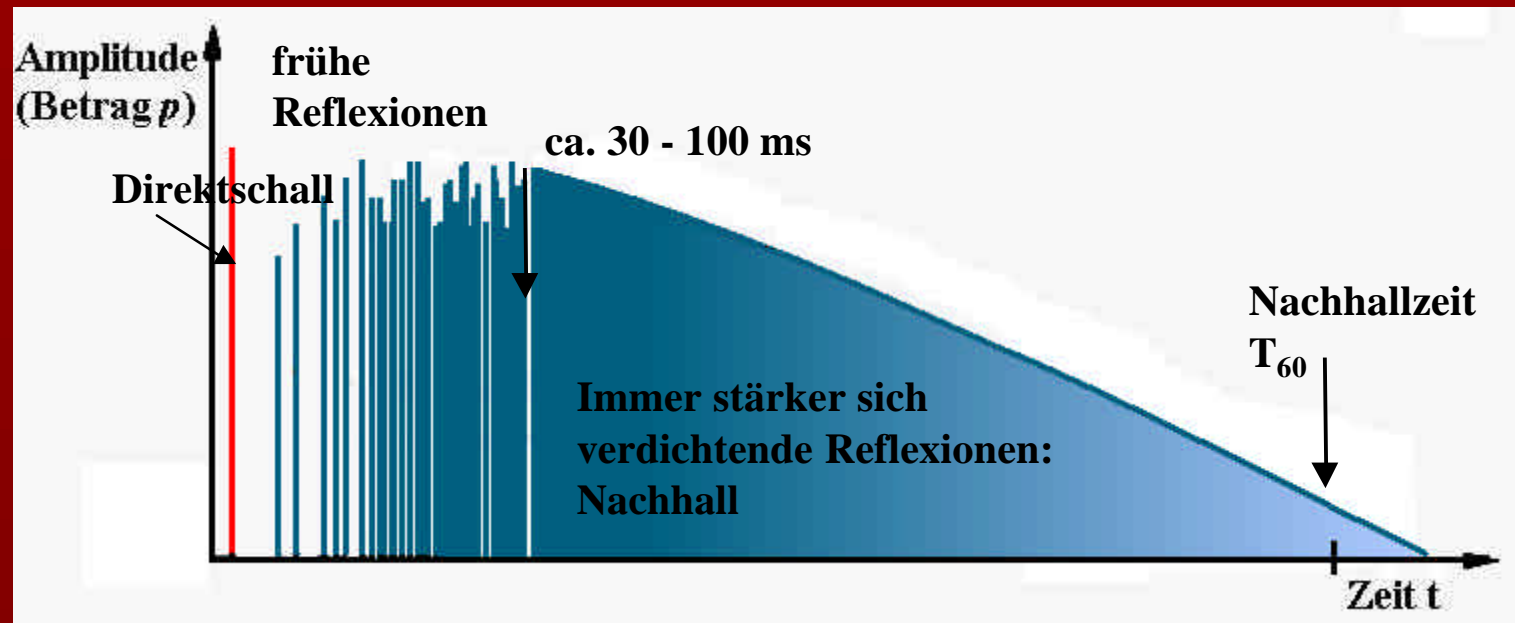
schallharte Wand: $\alpha = 0$ (Glas $\alpha \gg 0,2$) ; offenes Fenster $\alpha = 1$

Tontechnisches Praktikum

Schallfeldgrößen / Grundlagen der Schallausbreitung

Schallausbreitung in Räumen (statistisch)

Interessant in der Tonstudioteknik: Nachhallkurven.



1. Amplitude in Abhängigkeit von der Zeit

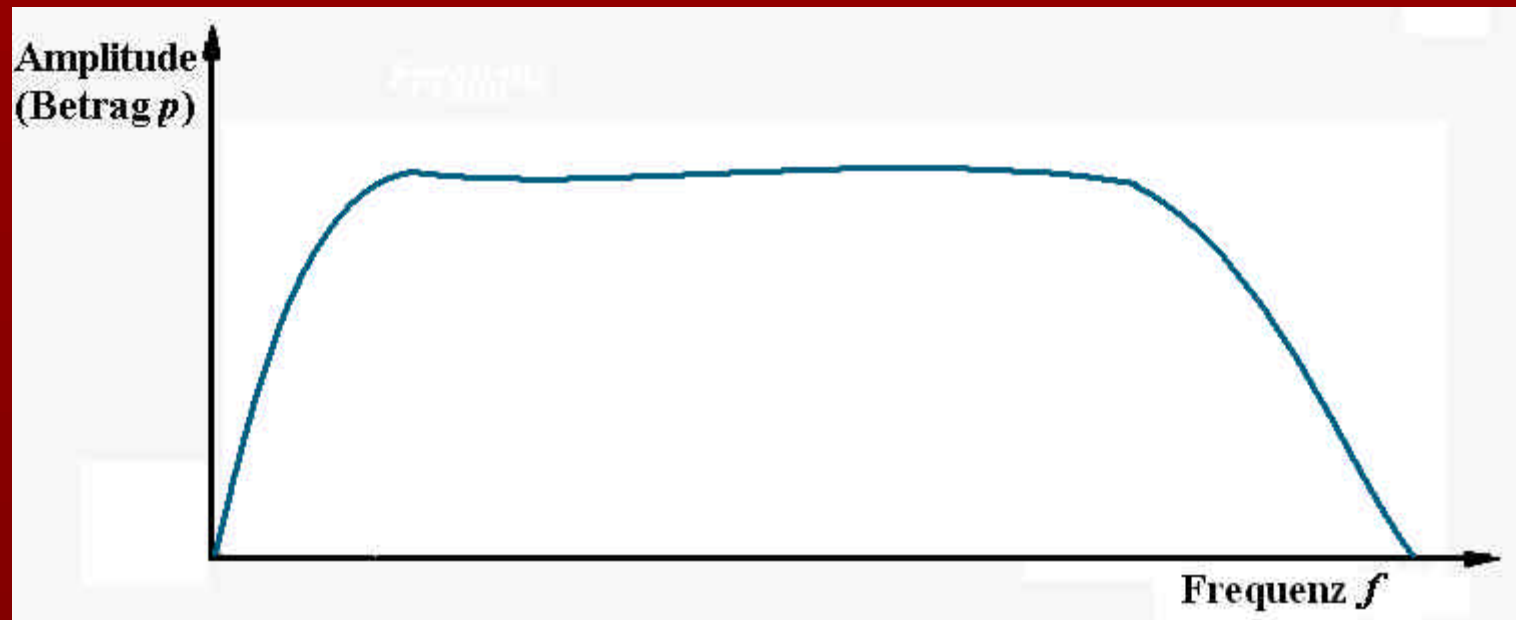
Nachhallzeit T_{60} ist die Zeit, in der die Schalleistung des Nachhalls nach Abklingen der Schallquelle auf den 10^{-6} -ten Teil (- 60dB) abgefallen ist.

Tontechnisches Praktikum

Schallfeldgrößen / Grundlagen der Schallausbreitung

Schallausbreitung in Räumen (statistisch)

Interessant in der Tonstudioteknik: Nachhallkurven.

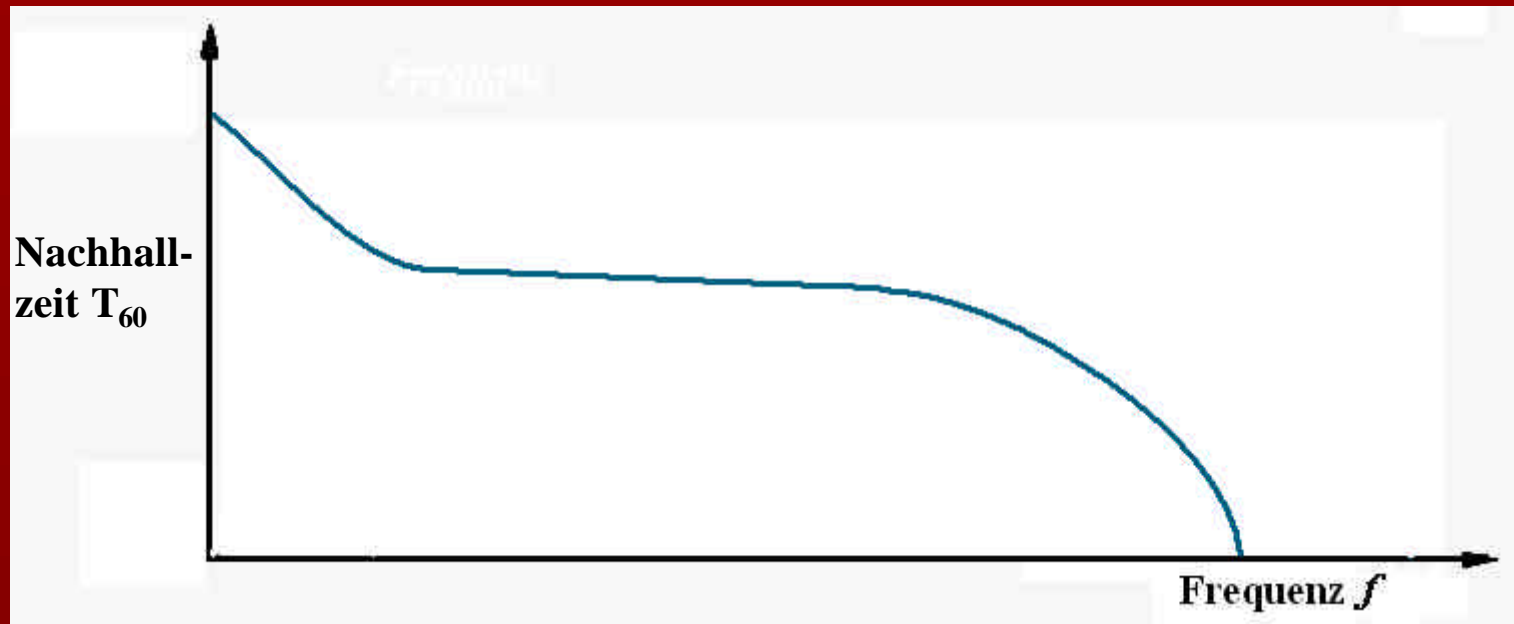


2. Amplitude in Abhängigkeit von der Frequenz
(Amplitudenspektrum; „Frequenzgang“)

Tontechnisches Praktikum

Schallfeldgrößen / Grundlagen der Schallausbreitung

Schallausbreitung in Räumen (statistisch)



3. Nachhallzeit in Abhängigkeit von der Frequenz. Messen oder Berechnen:

$$\text{Eyring: } t(f) = -0,163 \cdot \frac{V}{A \cdot \ln(1 - (A_B(f) / A))}$$

t : Nachhallzeit
 V : Volumen
 A_B : Absorptionsfläche
 A : Raumbegrenzungsflächen

$$\text{Sabine: } t(f) = 0,163 \cdot \frac{V}{A_B(f)}$$

(Sabinsche Formel gilt nur für $A_B / A < 0,2$)

Tontechnisches Praktikum

Schallfeldgrößen / Grundlagen der Schallausbreitung

Schallausbreitung in Räumen (statistisch)

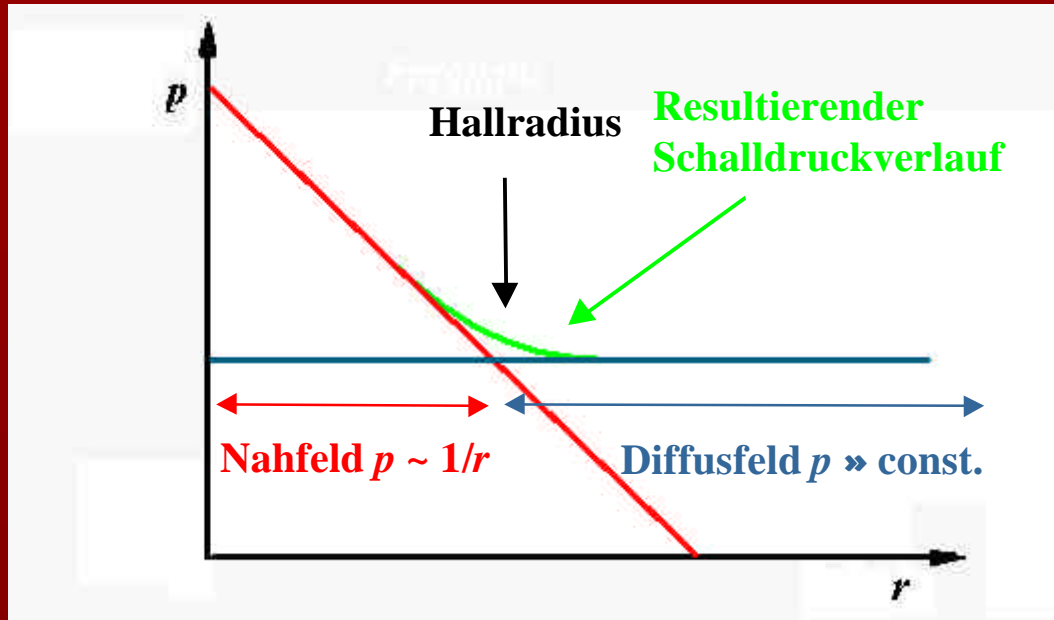
Beispiele für Nachhallzeiten (gemittelt über der Frequenz - entspricht etwa der subjektiv wahrgenommenen Nachhallzeit)

Raum	Nachhallzeit / s
Kirchen	3 bis 6
großer Konzertsaal	2 bis 3
Kammermusiksaal	ca. 2
Opernhaus	1,5 bis 2,5
Sprechtheater / Hörsaal	1 bis 1,5
Studioregie	0,25 bis 0,5

Tontechnisches Praktikum

Schallfeldgrößen / Grundlagen der Schallausbreitung

Schallausbreitung in Räumen (stat.)



In größerer Entfernung zur Schallquelle überwiegt der entfernungsunabhängige Diffusschall (ideal nur im Hallraum).

Den Übergang von Nahfeld zu Diffusfeld bezeichnet man als Hallradius.

Den (wirksamen) frequenzabh. Hallradius $r_h(f)$ eines Raumes kann man berechnen.

Er ist u.a. abh. Von der Richtwirkung der Schallquelle (Bündelungsgrad: $g_Q = p_{Q0}(f) / p_{Q \text{ diff}}(f)$) und des Empfängers (Mikro).

Achtung: r_h ist frequenzabh.!

Dem Hallradius wird in der TST oft eine zu hohe Bedeutung beigemessen.

4. Schalldruck in Abhängigkeit von der Entfernung

$$\text{Wirksamer Hallradius: } r_h = 0,057 \cdot \sqrt{\frac{V}{t} \cdot \gamma_Q \cdot \gamma_M}$$

t : Nachhallzeit
 V : Volumen

γ_Q : Bündelungsmaß, Quelle
 γ_M : Bündelungsmaß, Mikrofon

Tontechnisches Praktikum

Schallfeldgrößen / Grundlagen der Schallausbreitung

Literatur

- Veit, I.: *Technische Akustik*, 4.Auflage, Kamprath-Reihe Vogel Buchverlag Würzburg 1988
(Standort Bibliothek: AK 527)
- DIN 13xx (Begriffe der Akustik), Beuth-Vertrieb GmbH, Berlin und Köln
(Bibliothek: AK 126)
- Zollner, M., Zwicker, E.: *Elektroakustik*, 3. Auflage, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York 1993, S. 151 bis 179 (Standort Bibliothek: AK 902), S. 49 - 75
- Meyer, J: *Akustik und Musikalische Aufführungspraxis*, Verlag Bochinski, Kapitel 5 und 6 (Standort Bibliothek: AK ???)
- Gernemann, A.: *Messtechnische Untersuchung der akustischen Vorgänge beim natürlichen Hören im Vergleich zu den Vorgängen bei der Laufzeit- und "Intensitätsstereophonie"*, Verlag Shaker Aachen 1995, (Standort Bibliothek: AK 817), S. 4 - 9