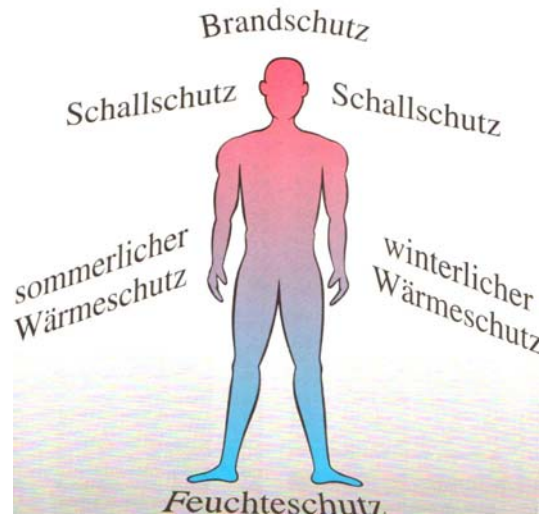
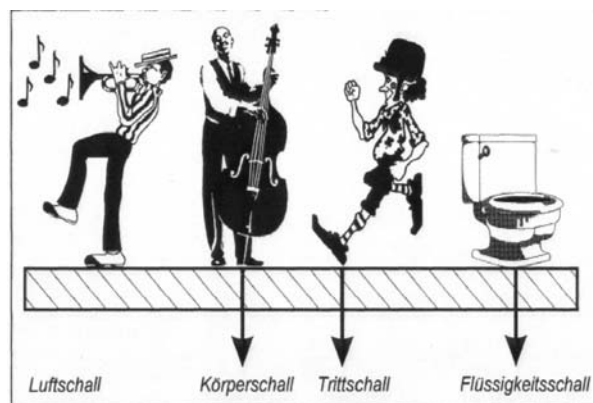


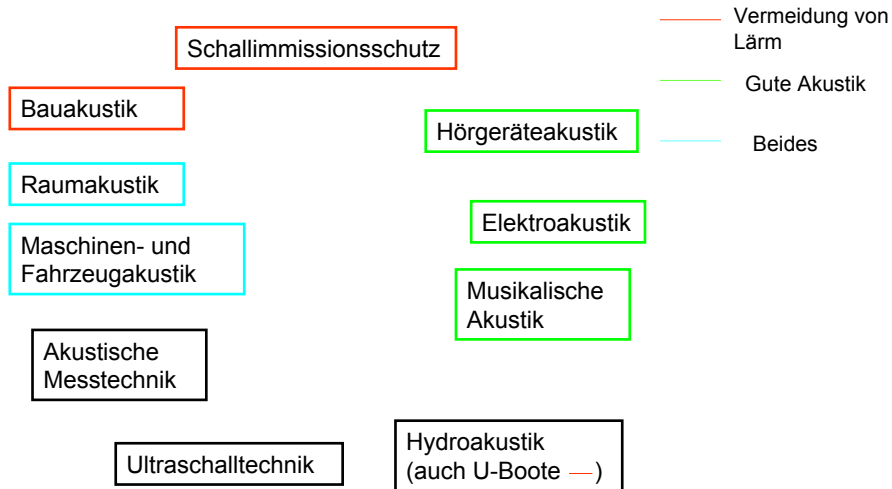
1. Akustik Grundlagen



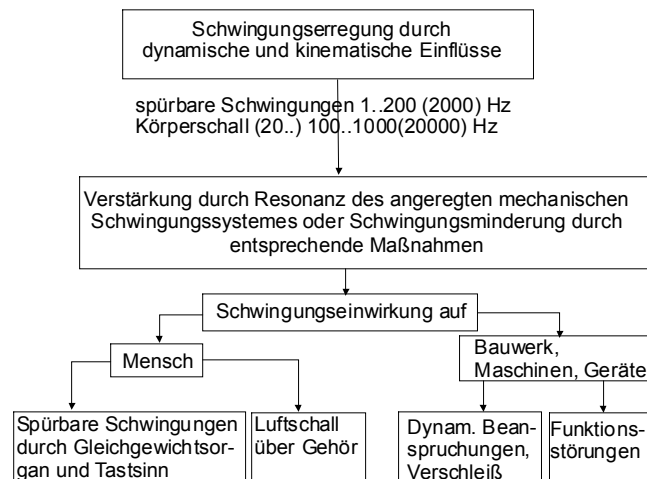
1. Akustik Grundlagen



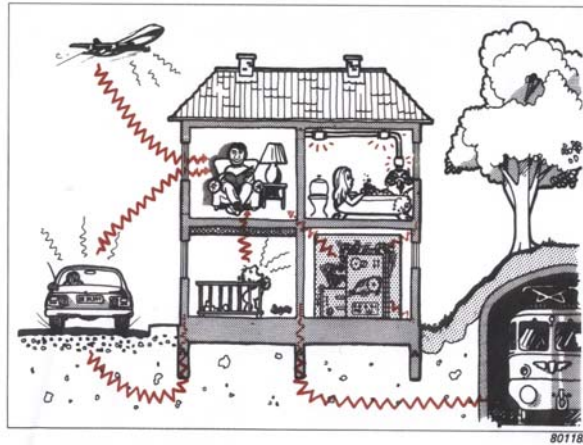
1.1 Teilgebiete der Akustik



1.1 Wirkung von Schwingungen

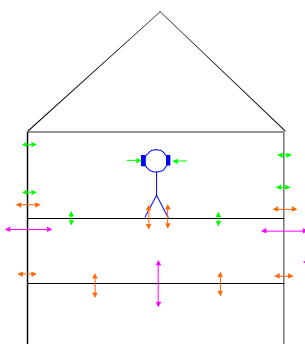


1.1 Wirkung auf Bauten



Quelle: Norsonic

1.1 Wirkung auf Bauten



- Von Raumbegrenzungsflächen abgestrahlter Körperschall als Luftschall,
- Anregung durch Luftschall außerhalb des Raumes oder Trittschall, keine Gebäudeschäden - Bauakustik
- Schwingungen größerer Amplitude und meistens kleiner Frequenz, Wahrnehmung als Vibrationen, Anregung durch Verkehr (Schieneverkehr insbesondere), Baumaßnahmen, selten Gewerbebetriebe, Gebäudeschäden möglich - Erschütterungsschutz
- Schwingungen mit sehr großen Schwingwegen, Wahrnehmung als Vibrationen, Gebäudeschäden sehr wahrscheinlich, falls keine erdbebensichere Bebauung, Anregung durch Erdbeben

1.1 Schalldruck

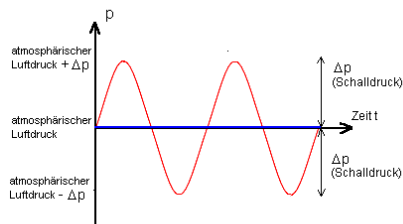


Damit Schall entstehen und sich ausbreiten kann, bedarf es einer Schallquelle und eines elastischen Mediums in dem sich der Schall fortpflanzen kann.

Steht die Schallquelle mit einem elastischen Medium, z.B. der Luft in Verbindung, so überträgt sie ihre Schwingungen auf die umgebenden Luftmoleküle. Die so angeregten Teilchen übertragen ihre Schwingungen wiederum auf ihre Nachbarmoleküle, so daß sich die von der Schallquelle ausgehende Erregung im gesamten Raum ausbreitet.

Um den Vorgang der Schallausbreitung zu veranschaulichen, werden in der nebenstehenden Grafik die Luftmoleküle durch Masseklötzchen dargestellt. Die elastische Kopplung zwischen den Teilchen, wird durch die Federn angedeutet.

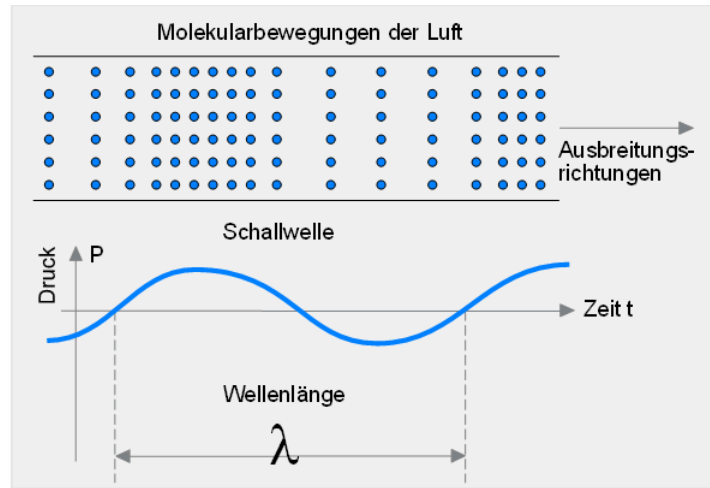
1.1 Schalldruck



Durch die Anregung der Luftmoleküle kommt es zu Zonen mit Verdichtungen und Verdünnungen der Teilchenabstände, die aufeinander folgen und sich wellenartig im Raum ausbreiten. Die Verdichtung der Molekülabstände verursacht einen Luftdruckanstieg gegenüber dem schon vorhandenen atmosphärischen Luftdruck. Analog wird durch die Verdünnung der Teilchenabstände ein niedrigerer Luftdruck erzeugt.

Auf diese Weise entstehen Luftdruckschwankungen die dem schon vorhandenen atmosphärischen Luftdruck überlagert und als Schalldruck $[p]$ bezeichnet werden. Da sich dieser Vorgang wellenförmig ausbreitet, spricht man von der Entstehung einer Schallwelle.

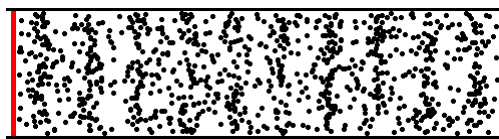
1.1 Schallwellen



1.1 Schallwellen

Eindimensionale ebene Welle bei harmonischer Anregung

Modell der Ausbreitung in einer Röhre



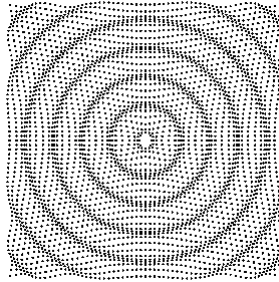
Bildquelle: Russel, Dean: Acoustics and Vibration Animations

$$p(x, t) = p_0 \cdot \cos \left[\omega \left(t - \frac{x}{c} \right) \right]$$

1.1 Schallwellen

Kugelwelle bei harmonischer Anregung

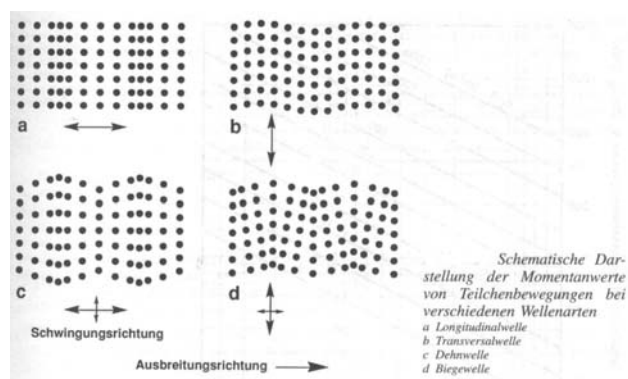
Darstellung für eine Ebene



Bildquelle: Russel, Dean: Acoustics and Vibration Animations

Anwendung bei Schallquelle für bauakustische Messungen Dodekaeder-Lautsprecher

1.1 Schallwellen



Wellenarten b bis d auch in Festkörpern, insbesondere Platten

1.1 Schallwellen

Ausbreitungsgeschwindigkeit der Schallwelle: Schallgeschwindigkeit

Schallgeschwindigkeit in Luft: $c = \left(330,5 + 0,605 \cdot \frac{\vartheta}{^{\circ}\text{C}} \right) \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}}$

c für Luft bei -20°C	ca. 320 m/s
c für Luft bei 0°C	ca. 332 m/s
c für Luft bei $+50^{\circ}\text{C}$	ca. 362 m/s
c für Wasser bei $+20^{\circ}\text{C}$	ca. 1460 m/s
c für Stahl / Aluminium	ca. 5100 m/s

$c = \lambda \cdot f$ mit λ Wellenlänge, f Frequenz

1.1 Schallwellen

Geschwindigkeit der schwingenden Teilchen: Schwinggeschwindigkeit
oder Schallschnelle der schwingenden Teilchen

Momentangeschwindigkeit eines schwingenden Teilchens

$$\vec{v} = \frac{d\vec{\xi}}{dt} \quad \xi: \text{Auslenkung des Teilchens}$$

Beispiel: lautes Sprechen mit Frequenz 1000 Hz hat eine Schallleistung
von $1 \mu\text{W}/\text{m}^2$, Maximalwert der Schallschnelle $v_{\text{max}} = 0,07 \text{ mm/s}$

1.1 Schallwellen

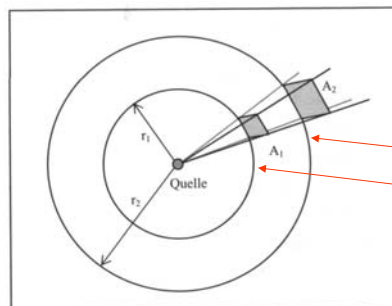
Bei ebenen fortschreitenden Schallwellen gilt:

$$v = \frac{p}{Z} = \frac{I}{p} = \sqrt{\frac{I}{Z}} = \sqrt{\frac{P_{ak}}{Z \cdot A}}$$

Mit:

p	Schalldruck	Pa = N/m ²
Z	Schallkennimpedanz	Ns/m ³ Luft 20°C 413 Ns/m ³ , Wasser 1480000 Ns/m ³
I	Schallintensität	W/m ²
P _{ak}	Schalleistung	W
A	durchschallte Fläche	m ²

1.1 Schallintensität, Schalleistung



r_1 zu r_2 Schalleistung der Quelle bleibt gleich (Idealisierung: keine Schallabsorption), aber Schallintensität (auch Schalldruck) nimmt ab.

Bei Freifeldbedingungen (kugelförmige Ausbreitung):

$$I = \frac{P_{ak}}{4\pi \cdot r^2}$$

Schallintensität $\vec{I} = p \cdot \vec{v}$

Schalleistung $P_{ak} = \int_A \vec{I} d\vec{A}$

1.1 Schalleistung

Höchste erzeugte zivile Schalleistung Start Saturn-V Rakete mit ca. 10 MW!

Zerstörungen an Bauwerken dabei mit zerbrochene Fensterscheiben in 12 km Entfernung

Quelle	Leistung P / W
Raketenstart	10.000
Sirene	2.000
Lautsprecher	200
Orchester	70
Orgel, fortissimo	10
Hupe	5
Presslufthammer	1
Flügel	0,5
Trompete	0,3
Geige, fortissimo	0,001
Lautes Schreien	0,002
Vortragstätigkeit	0,00003
Unterhaltung	0,00001

1.1 Schallpegel

Die Höhe der Schalleistungen und Schalldrücke üblicher Schallquellen hat eine Spanne von vielen Zehnerpotenzen.

Deshalb logarithmische Skala, Abbildung auf viel kleinere Zahlenspanne

$$L_p = 10 \lg \frac{\tilde{p}^2}{\tilde{p}_0^2} = 20 \lg \frac{\tilde{p}}{\tilde{p}_0} \text{ dB} \quad \tilde{p}_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$$

\tilde{p}_0 Wechseldruck an Hörschwelle

\tilde{p} Effektivwert

$$\tilde{p} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p^2(t) dt}$$

1.1 Pegel

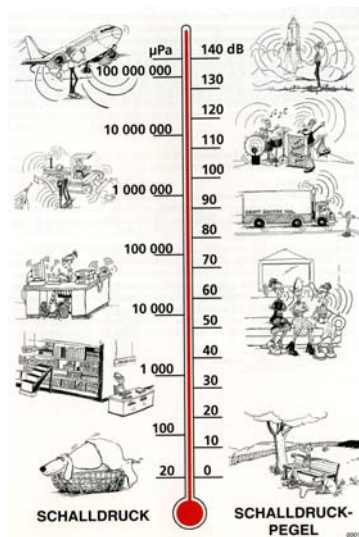
$$L_I = 10 \lg \frac{I}{I_0} \text{ dB} \quad I_0 = 10^{-12} \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

$$L_W = 10 \lg \frac{P}{P_0} \text{ dB} \quad P_0 = 10^{-12} \text{ W}$$

I_0 Schallintensität bei ebener Welle in Luft von 20°C bei Schalldruck
 $p = 20 \text{ } \mu\text{Pa}$

P_0 Schalleistung bei I_0 und Fläche 1 m²

1.1 Schallpegel reale Quellen



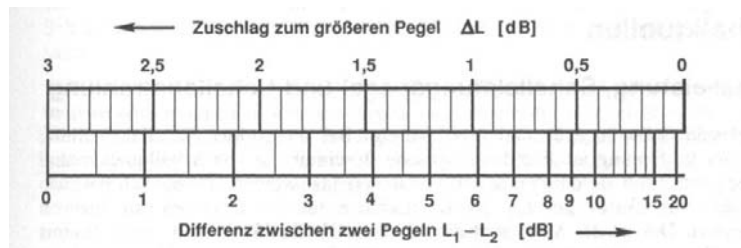
Quelle: Bruel & Kjaer. Umweltlärm

1.1 Pegelrechnungen

Addition:

Es gilt energetische Addition (Summe der Quadrate der Schalldrücke)

$$L_{ges} = 10 \lg \left(\sum_{j=1}^n \left[\frac{p_j}{p_0} \right]^2 \right) = 10 \lg \sum_{j=1}^n 10^{0,1 \cdot L_j} \text{ dB}$$



1.1 Pegelrechnungen

Addition von Pegeln:

2 gleiche Pegel - Erhöhung um 3 dB

Aber

Schallausbreitung im Freifeld bei Punktquelle bei doppelter Entfernung von Quelle mit $r_2 = 2 r_1$:

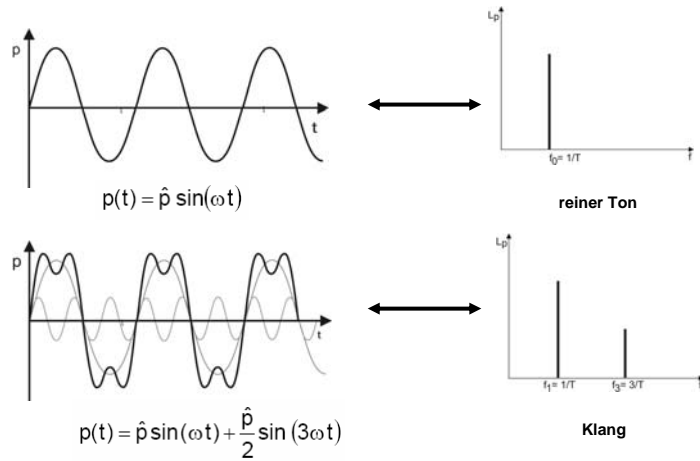
Pegelminderung um 6 dB bei Entfernungsverdopplung

Wegen

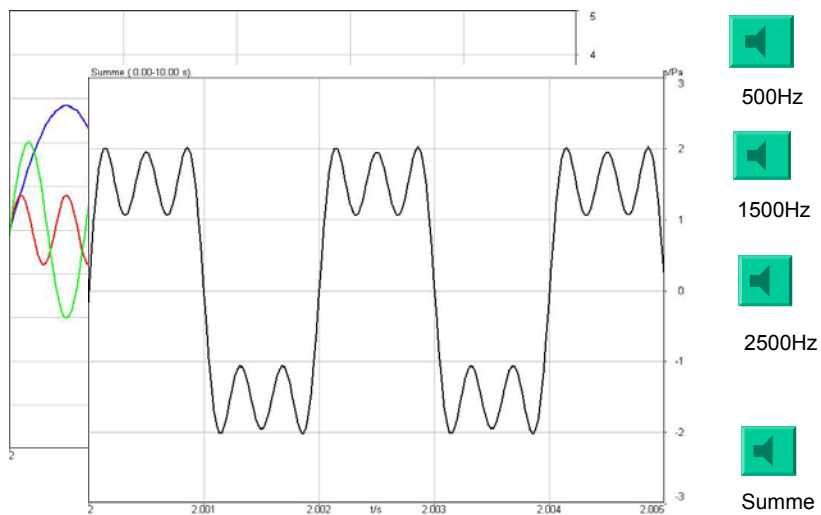
$$I = \frac{P_{ak}}{4\pi \cdot r^2} \quad p^2 = I \cdot Z \quad L_p = 10 \lg \frac{\tilde{p}^2}{\tilde{p}_0^2} \text{ dB}$$

1.2 Geräusche im Zeit- und Frequenzbereich

Periodische Signale als Zeitfunktion und als Spektrum
 Alle periodischen Signale haben ein diskretes Spektrum

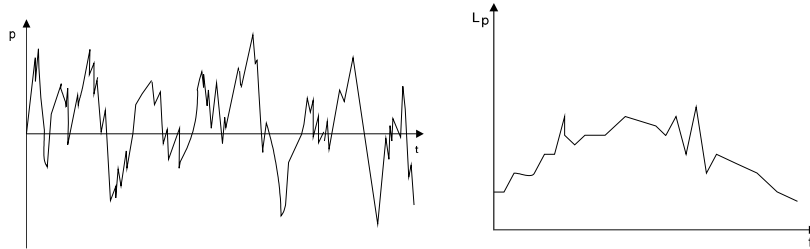


1.2 Geräusche im Zeit- und Frequenzbereich

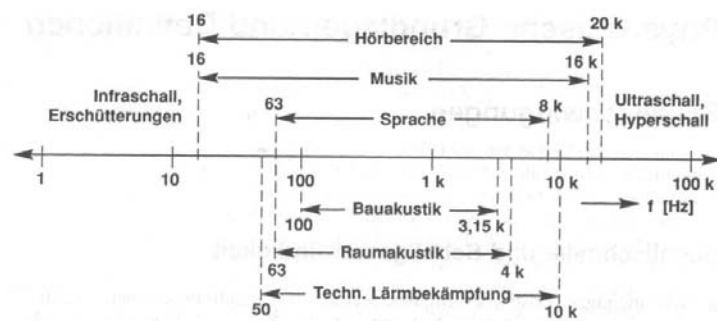


1.2 Geräusche im Zeit- und Frequenzbereich

Stochastisches Signal als Zeitfunktion und als Spektrum
 Alle nichtperiodischen Signale haben ein kontinuierliches Spektrum

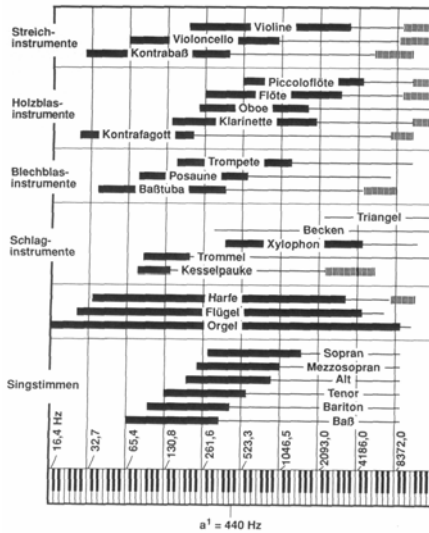


1.2 Frequenzbereiche der Akustik



Übliche Einteilung des Hörbereiches in Frequenzintervalle mit Oktaven und Bruchteile von Oktaven (wie in Musik)

1.2 Frequenzbereiche der Akustik



Oktave

$$f_o = 2 \cdot f_u$$

Terz

$$f_o \approx 1,28 \cdot f_u$$

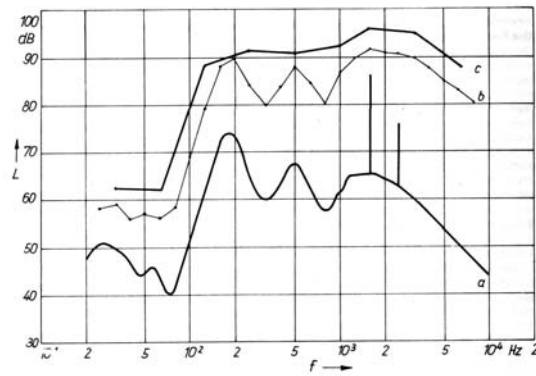
3 Terzen sind eine Oktave

1.2 Frequenzbereiche der Akustik

Oktavband			Terzband		
f_u Hz	f_m Hz	f_o Hz	f_u Hz	f_m Hz	f_o Hz
90	125	180	90	100	112
			112	125	140
			140	160	180
180	250	355	180	200	224
			224	250	280
			280	315	355
355	500	710	355	400	450
			450	500	560
			560	630	710
710	1.000	1.400	710	800	900
			900	1.000	1.120
			1.120	1.250	1.400
1.400	2.000	2.800	1.400	1.600	1.800
			1.800	2.000	2.240
			2.240	2.500	2.800
2.800	4.000	5.600	2.800	3.150	3.550

Terz- und Oktavbänder der Bauakustik

1.2 Frequenzbereiche der Akustik

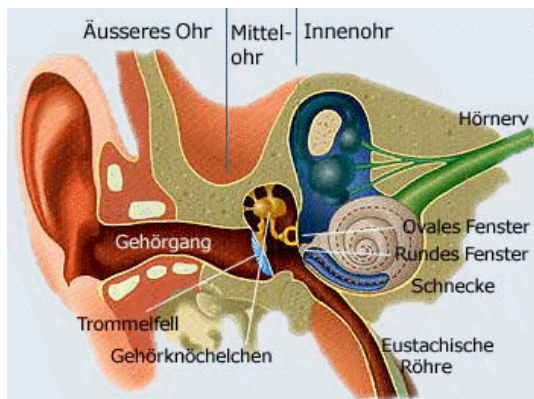


a) Schmalbandanalyse ($\Delta f = 1$ Hz), b) Terzbandanalyse, c) Oktavbandanalyse

Mit steigender Bandbreite von Schmalbandanalyse bis zu Oktavbandanalyse verschwinden Details, die Ursachenermittlung bzw. Lästigkeitsbeurteilungen ermöglichen

Günstigster Kompromiss auch für Bauakustik: Terzanalysen

1.2 Wirkung von Lärm – Physiologie des Hörens



1 dB Pegeländerung ist gerade noch hörbar. Das Ohr ist das empfindlichste Sinnesorgan des Menschen.

Bei **mittleren Frequenzen und Pegeln** ergibt ein Pegelunterschied von 10 dB eine Verdoppelung oder Halbierung des Lautstärkeindrucks.

Ohrmuschel fängt den Schall auf; er wird durch den Gehörgang geleitet und versetzt das **Trommelfell** in Schwingungen

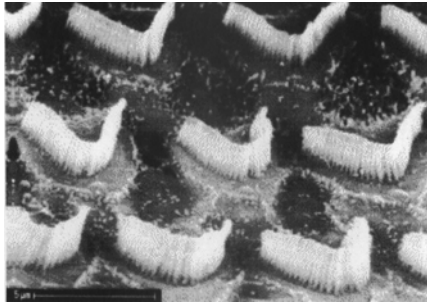
Die winzigen Gehörknöchelchen **Hammer, Amboss und Steigbügel** nehmen die Schwingungen auf

Der Steigbügel überträgt die Schwingungen auf das ovale Fenster der **Ohrschncke**

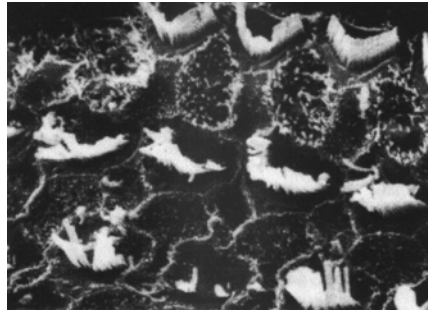
Je nach Frequenz des Geräusches werden Haare (Zilien) verschiedener Reihen von Haarzellen auf der **Basilarmembran** im Schnecken-gang bewegt, Schallenergie wird in elektrische Energie umgewandelt

1.2 Wirkung von Lärm – Physiologie des Hörens

Viel Lärm (auf Dosis kommt es an) schädigt die Haarzellen, keine Regeneration möglich

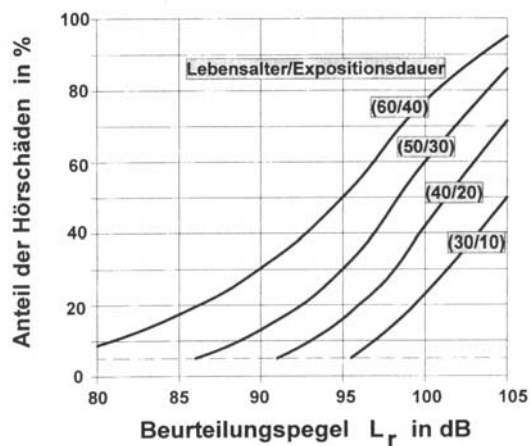


Intakte Haarzellen



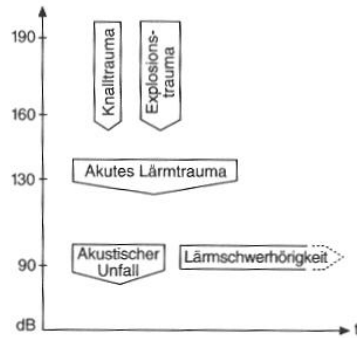
geschädigte Haarzellen

1.2 Wirkung von Lärm – Physiologie des Hörens



Beurteilungspegel: Maß zur Kennzeichnung der auf einen Ort wirkenden Schallimmission. Er soll zur Kennzeichnung der Belastung vor Lärm zu schützender Menschen dienen. Der Beurteilungspegel wird hier als energetische Summe des Schalldruckpegels ermittelt.

1.2 Wirkung von Lärm – Physiologie des Hörens



Akustische Traumen

Knalltrauma (>150dB, <1ms)

Schädigung des Innenohres, Degeneration der Haarzellen

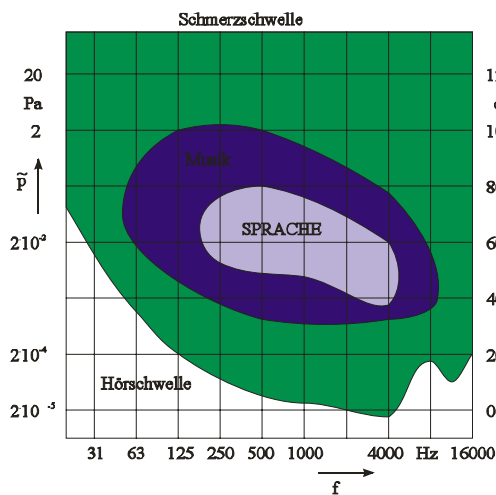
Explosionstrauma (>150dB, >2ms)

Schädigung des Mittel- und Innenohres, Trommelfellrisse, Brüche der Gehörknöchelchen, Blutungen

Lärmschwerhörigkeit - akutes und chronisches Lärmtrauma (85-90 dB, Lang andauern)

PTS (Permanent Threshold Shift) – bleibende Hörschwellenverschiebung,
TTS (Temporary Threshold Shift) – vorübergehende Hörschwellenabsenkung

1.2 Wirkung von Lärm – Physiologie des Hörens



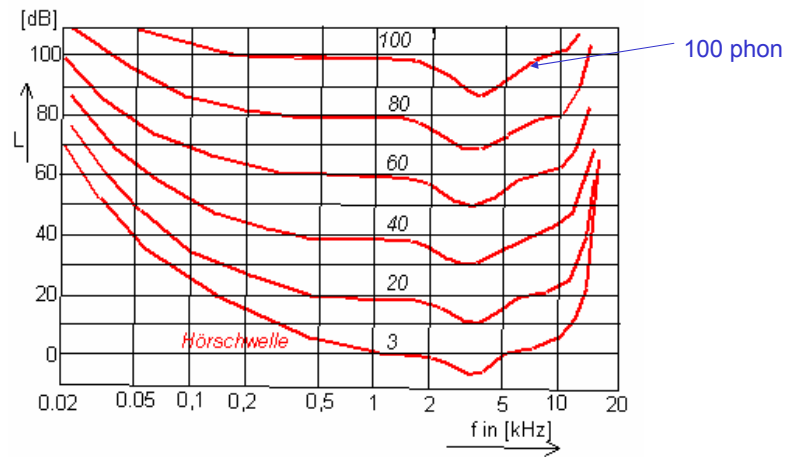
Grenzen des Hörens-Hörfläche normalhörender Personen

Frequenzbereich
16 Hz ... 16.000 Hz

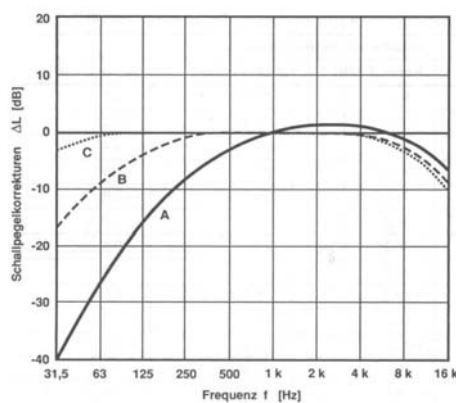
Druckbereich
 $2 \cdot 10^{-5}$ Pa ... 100 Pa

starke Frequenzabhängigkeit der Hörschwelle

1.2 Wirkung von Lärm – Physiologie des Hörens
Kurven gleicher Lautstärke



1.2 Wirkung von Lärm – Physiologie des Hörens
Bewertungskurven – Anpassung an Menschen



Normung:

A-Bewertung Kurve gleicher Lautstärke für ca. 40 phon – Bewertungskurve für Lärmbelästigung

B-Bewertung Kurve gleicher Lautstärke für ca. 80 phon – kaum verwendet

C-Bewertung Kurve gleicher Lautstärke für ca. 100 phon – Bewertungskurve für kurze Impulse und tieffrequente Geräusche

1.2 Wirkung von Lärm – Physiologie des Hörens

Bewertungskurven – Anpassung an Menschen

f_m [Hz]	25	31,5	40	50	63	80	100	125	160	200
Δ_A	-44,7	-39,4	-34,6	-30,2	-26,2	-22,5	-19,1	-16,1	-13,4	-10,9
Δ_C	-4,4	-3	-2	-1,3	-0,8	-0,5	-0,3	-0,2	-0,1	0
f_m [Hz]	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000
Δ_A	-8,6	-6,6	-4,8	-3,2	-1,9	-0,8	0	0,6	1	1,2
Δ_C	0	0	0	0	0	0	0	0	-0,1	-0,2
f_m [Hz]	2500	3150	4000	5000	6300	8000	10000	12500	16000	20000
Δ_A	1,3	1,2	1	0,5	-0,1	-1,1	-2,5	-4,3	-6,6	-9,3
Δ_C	-0,3	-0,5	-0,8	-1,3	-2	-3	-4,4	-6,2	-8,5	-11,2

1.2 Wirkung von Lärm – Physiologie des Hörens

Schalldruckgrößen, Zeitbewertung

Bei einer **Zeitbewertung** wird der Zeitverlauf eines mit Schallpegelmessern oder Analysatoren gemessenen Schalldruckpegels mit einer bestimmten Zeitkonstanten gefiltert. Die eingestellte Zeitbewertung beeinflusst somit die Trägheit des angezeigten oder gemessenen Pegelverlaufes.

Genormt sind:

S (slow): Zeitkonstante 1 s

F (fast): Zeitkonstante 125 ms

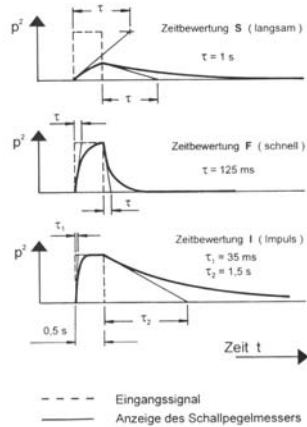
I (Impuls): Zeitkonstante Pegelanstieg 35 ms, Zeitkonstante Pegelabfall 1,5 s

Zusätzlich ist die Zeitbewertung "Peak" (engl. Spitze) festgelegt (Verwendung bei Arbeitsplatzlärm, Schädigung durch kurze und hohe Schalldruckpegel), bei der eine sehr kurze Zeitkonstante beim Pegelanstieg verwendet wird und kein Abfall des angezeigten Pegels erfolgt. Der Spitzenwert im gesamten Pegelverlauf wird also gehalten.

1.2 Wirkung von Lärm – Physiologie des Hörens

Schalldruckgrößen, Zeitbewertung

Exponentielle Mittelung, zeitlich weiter zurückliegende Pegel gehen mit geringerer Wichtigung in die Mittelung ein, genormt drei unterschiedliche Zeitkonstanten



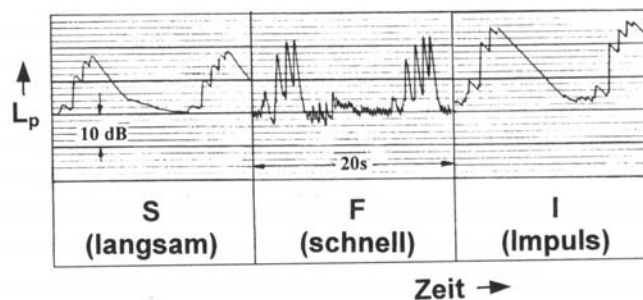
Slow: sehr träge, hohe Spitzenpegel werden nicht dargestellt, „Ersatz für energieäquivalenten Mittelwert bei Schallpegelmessern mit Zeigerinstrumenten“

Fast: bildet Schalldruckempfindung des Menschen am besten nach, heute bevorzugte Zeitbewertung

Impuls: stammt aus Zeit der Zeigerinstrumente, schneller Anstieg und sehr langsamer Abfall, um Zeigerausschlag erfassen zu können

1.2 Wirkung von Lärm – Physiologie des Hörens

Schalldruckgrößen, Zeitbewertung



Geräusch Schmiedehammer

Was kennzeichnet die Lärmwirkung am sinnvollsten?

1.2 Wirkung von Lärm – Physiologie des Hörens

Schalldruckgrößen, Mittelungspegel und Beurteilungspegel

Mittelung zu äquivalenten Dauerschallpegel - Lärmdosis

$$L_{eq} = 10 \cdot \lg \left[\frac{1}{T} \int_0^T 10^{0,1 \cdot L(t)} dt \right]$$

Approximation Integral durch Summe

$$L_{eq} = 10 \cdot \lg \left[\frac{1}{T} \cdot \sum_{i=1}^n T_i \cdot 10^{0,1 L_{eq,i}} \right] \quad \text{mit} \quad T = \sum_{i=1}^n T_i$$

1.2 Wirkung von Lärm – Physiologie des Hörens

Schalldruckgrößen, Mittelungspegel und Beurteilungspegel

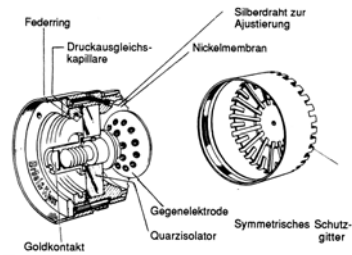
Der Beurteilungspegel dient zur Kennzeichnung der Belastung vor Lärm von zu schützenden Menschen. Der Beurteilungspegel ist keine direkt messbare Größe durch die Anwendung von Zuschlägen.

$$L_r = 10 \lg \left[\frac{1}{T_r} \sum_{i=1}^n T_i \cdot 10^{0,1(L_{m,i} + K_{I,i} + K_{T,i})} \right]$$

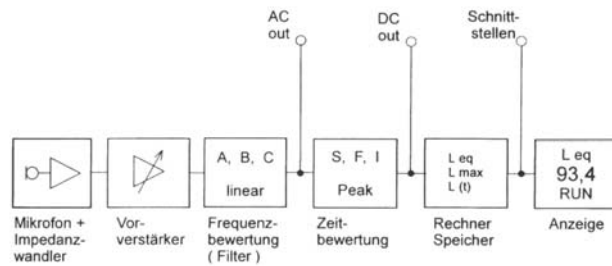
T_r	Beurteilungszeit, z.B. 8 h, 16 h, 1 h
$L_{m,j}$	äquivalenter Dauerschallpegel in Zeit j
K_{ij}	Zuschlag für Impulshaltigkeit in der Zeit j
$K_{T,j}$	Zuschlag für Ton- und Informationshaltigkeit in der Zeit j

1.2 Messung von Lärm

Schnitt durch ein Kondensatormikrofon



Blockschaltbild Schallpegelmesser



1.2 Wirkungen von Schall auf den Menschen

Physische Auswirkungen

Minderung des Hörvermögens ab 85 dB(A) durch:

- kurze Einwirkungen, z.B. Hämmern: zeitweilige Hörschwellenverschiebung
- langdauernde oder kurze sehr laute Einwirkungen, z.B. Walkman, Disco und Technosound, Heimwerkergeräte, Knalle über 120 dB(A): dauerhafte Hörschwellenverschiebung => Schwerhörigkeit => Vertäubung

Psychophysische Auswirkungen

Stress und Nervosität als Risikofaktoren für Herz-Kreislaufkrankungen, z. B.

Herzinfarkt,

- Störung der Schlafqualität,
- üble Laune, Ärger, Ohnmachtsgefühle,
- Beeinträchtigung des Lebensgefühls,
- Erhöhung des Medikamentenkonsums,
- Zunahme der Fehleranfälligkeit,
- Abnahme der Lernfähigkeit.

1.2 Wirkungen von Schall auf den Menschen

Soziale Auswirkungen

Anheben der Stimme, Lauterdrehen von Radio und Fernsehen, Abnahme der Verständlichkeit, Unterlassen von Kommunikation, Veränderung der Nutzung von Wohnräumen, Terrassen, Balkonen und Gärten sowie des Lüftungsverhaltens,

Abnahme von Hilfsbereitschaft und häuslicher Geselligkeit, Ghettobildung.

Ökonomische Auswirkungen

Krankheitskosten und Berufsunfähigkeitsrente wegen Schwerhörigkeit die häufigste Berufskrankheit und zunehmende Kinder und Jugendkrankheit, Kosten für Schlafmittel, Arzt u. ä., Wertminderung von Grundstücken, Kosten für Fehler.

1.2 Wirkungen von Schall auf den Menschen

Lärm ist eben kein Lärm, sondern Schall, der zur falschen Zeit am falschen Ort zu hören ist.

Zwei ähnliche Geräusche können - selbst bei gleichem Schallpegel - sehr unterschiedlich empfunden werden. Ein Wasserfall in einer idyllischen Bergwelt wird allgemein mit Erholung gleichgesetzt, während eine befahrene Autobahn eine Belastung darstellt.

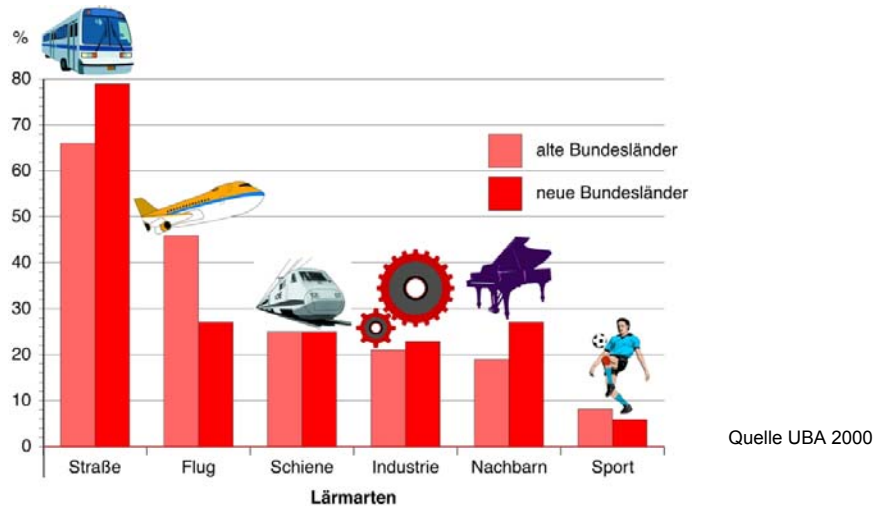


Autobahnverkehr



Die Ruhe eines Wasserfalls

1.2 Wirkungen von Schall auf den Menschen



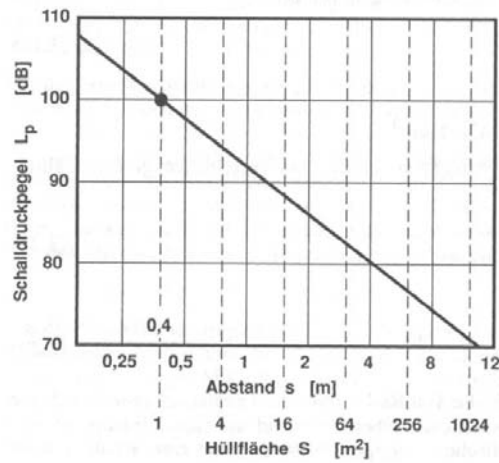
1.3 Schallfelder - Freifeld

Reale Ausbreitung

$$L_p = L_w + D_I + K_0 - D_s - \Sigma D \quad dB$$

D_I	Richtwirkungsmass in dB
K_0	Raumwinkelmass in dB (ungehindert 0 dB, über refl. Boden 3 dB, über refl. Boden und vor Wand 6 dB)
D_s	Abstandsmass in dB $20 \lg(r/r_0)$
ΣD	Einflüsse auf die Schallausbreitung

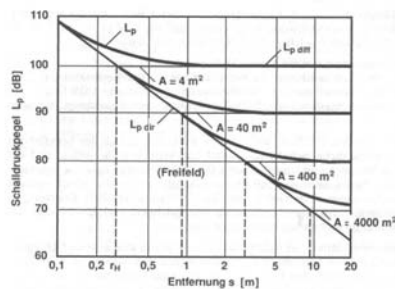
1.3 Schallfelder - Freifeld



Schalldruckpegelabnahme
bei Abstrahlung einer Punktschall-
quelle in den Halbraum
Schalleistungspegel $L_W = 100$ dB

1.3 Schallfelder – Schallausbreitung in Räumen

Für beliebige reale Räume Simulationsrechnungen aufwendig.
Nur für einfache Raumtypen formelmäßig angebar



Schalldruckpegelabnahme im diffusen Schallfeld bei verschiedenen äquivalenten Schallabsorptionsflächen A
 $L_W = 100$ dB; kugelförmige Abstrahlcharakteristik

Einfachster Fall: kubischer
Raum mit diffus
Schallfeld

Ideales diffuses Schallfeld:
Schalldruck an jedem
Raumpunkt gleich,
Schallintensität überall 0!

1.3 Schallfelder – Schallausbreitung in Räumen

