FESI Dokument A2
FESI Document A2

Grundlagen der Akustik
Basics of Acoustics

Juli 2013, 4. überarbeitete Version
July 2013, 4th revised edition

FESI Office:

EiiF - European Industrial Insulation Foundation
Mr. Andreas Gürtler
Avenue du Mont-Blanc 33
1196 Gland, Switzerland
Tel.: 0041 22 99 500 70
e-mail: andreas.guertler@eiif.org

Grundlagen der Akustik
Basics of Acoustics

Inhalt **Contents**

A2-0 Absicht ... 3
A2-0 Intention ... 3
A2-1 Einführung ... 3
A2-1 Introduction ... 3
A2-2 Einordnung und Einteilung ... 4
A2-2 Classification ... 4
A2-2.1 Schallempfindung ... 5
A2-2.1 Sound sensation ... 5
A2-2.2 Infra-, Hör- und Ultraschall ... 7
A2-2.2 Infrasonic, audible and ultrasonic sound ... 7
A2-2.3 Luft-, Körper- und Wasserschall ... 8
A2-2.3 Airborne, structure-borne and waterborne sound ... 8
A2-2.4 Schalldämmung und Schalldämpfung ... 9
A2-2.4 Acoustic insulation and sound attenuation ... 9
A2-3 Physikalisch-technische Grundlagen ... 9
A2-3 Physical, technical basics ... 9
A2-3.1 Frequenz, Schallgeschwindigkeit, Wellenlänge ... 9
A2-3.1 Frequency, speed of sound, wavelength ... 9
A2-3.2 Ton, Klang, Geräusch, Rauschen, Knall ... 11
A2-3.2 Tone, complex total sound, noise, random noise, bang ... 11
A2-3.3 Frequenzanalyse (Filter, Terzen, Oktaven) ... 13
A2-3.3 Frequency analysis (filter, third-octaves, octaves) ... 13
A2-3.4 Schallpegel ... 15
A2-3.4 Sound levels ... 15
A2-3.4.1 Schalldruck ... 16
A2-3.4.1 Sound pressure ... 16
A2-3.4.2 Schallschnelle ... 16
A2-3.4.2 Sound-particle velocity ... 16
A2-3.4.3 Schallintensität ... 17
A2-3.4.3 Sound intensity ... 17
A2-3.4.4 Schallleistung ... 17
A2-3.4.4 Sound power ... 17
A2-3.4.4 Zusammenhang vorgenannter akustischer Kenngrößen und deren Bezugsgröße ... 20
A2-3.4.4 Connection between a. m. acoustic characteristic quantities and their reference quantities ... 20
A2-4 Physiologisch-technische Grundlagen ... 21
A2-4 Physiological, technical basics ... 21
A2-4.1 Zeitbewertung ... 21
A2-4.1 Time weighting ... 21
A2-4.2 Frequenzbewertung ... 23
A2-4.2 Frequency weighting ... 23
A2-4.3 Grenzkurven ... 24
A2-4.3 Rating curves ... 24
A2-4.4 Lautstärke ... 25
A2-4.4 Loudness level ... 25
A2-4.5 Lärmschwerhörigkeit ... 26
A2-4.5 Noise-induced hearing loss ... 26
A2-5 Pegelarithmetik ... 27
A2-5 Level arithmetics ... 27
A2-5.1 Addition von Pegeln ... 27
A2-5.1 Addition of levels ... 27
A2-5.2 Subtraktion von Pegeln ... 28
A2-5.2 Subtraction of levels ... 28
A2-5.3 Räumliche und zeitliche Mitteilung von Pegeln ... 28
A2-5.3 Space and time averaging of levels ... 28
A2-5.4 Beurteilungspegel ... 29
A2-5.4 Noise rating levels ... 29
A2-5.5 Äquivalente Dauerschallpegel / Mittelungspegel ... 30
A2-5.5 Level statistics ... 30
A2-6 Bedeutung von Symbolen, Einheiten und Größen ... 31
A2-6 Meaning of symbols, units and abbreviations ... 31
A2-7 Normen und Literatur / Quellen ... 34
A2-7 Standards and literature / Sources ... 34
A2-8 Einführung in die Folgedokumente ... 34
A2-8 Introduction in the following documents ... 34
A2-8.1 Hindernisse für die Ausbreitung von Luftschallwellen ... 34
A2-8.1 Obstacles to the propagation of airborne acoustic waves ... 34
A2-8.2 Schlussfolgerungen: Bestimmung der akustischen Eigenschaften von Baumaterial und Bauteilen ... 35
A2-8.2 Consequences: Determination of acoustical characteristics of building materials and building elements ... 35
A2-8.3 Das Gebiet der Gebäudeakustik ... 35
A2-8.3 The area of acoustics in buildings ... 35
A2-8.3.1 Schallausbreitung in der Umgebung der Schallquelle ... 35
A2-8.3.1 Propagation of sound in the vicinity of the sound source ... 35

A2-8.4 Eindringen von Schall in Räume, die dem Raum mit der Schallquelle benachbart sind 36
A2-8.4 Transmission of sound into rooms neighbouring the one where the sound source is located.....36
A2-8.5 Besondere Probleme der Schalleinleitung ins Freie aus Räumen oder Gebäuden 36
A2-8.5 Special problems of the transmission of a noise from a room or a building into the open.....36

A2-0 Absicht

Das FESI Dokument A2 „Grundlagen der Akustik“ ist das erste einer Serie von sechs Papieren zu denjenigen akustischen Problemen und ihren Lösungen, die sich Bauherren stellen.

Die benutzte Terminologie entspricht der im CEN üblichen und wurde in enger Zusammenarbeit mit dem Akustischen Technischen Komitee TC 126 entwickelt.

Die Gesamtserie von akustischen Dokumenten wird aus folgenden Titeln bestehen:

A2 „Grundlagen der Akustik“ – 4.überarbeitete Auflage, Juli 2013
A3 „Eigenschaften von Baustoffen – Schalldämmung, Absorption, Dämpfung“ – 1.überarbeitete Auflage, Juli 2013
A4 „Gebäudeakustik“- 1.überarbeitete Auflage, Juli 2013
A5 „Akustik in Räumen“ -1.überarbeitete Auflage, Juli 2013
A6 „Akustik in der Industrie“ – 3. überarbeitete Auflage, Juli2013
A7 “Guidance through FESI Documents A2 through A6” - 1.überarbeitete Auflage, Juli 2013

A2-0 Intention

The FESI Document A2 “Basics of acoustics” is the first of a series of six papers on acoustical problems that present themselves to the builder and their solutions.

The terminology used has been taken from CEN in close cooperation with the Acoustical Technical Committee TC 126.

The total block of acoustical documents will comprise the following titles:

A2 “Basics of acoustics” – Rev.4, July 2013
A3 “Product characteristics – Acoustic insulation, absorption, attenuation” – Rev.1, July 2013
A4 “Acoustics in buildings” – Rev.1, July 2013
A5 “Acoustics in rooms” – Rev.1, July 2013
A6 “Industrial acoustics” – Rev. 3, July 2013
A7 “Guidance through FESI Documents A2 through A6” - Rev.1, July 2013

A2-1 Einführung

Seit der Mitte dieses Jahrhunderts hat die stetig wachsende Bevölkerungsdichte, die stürmische Motorisierung sowie die fortschreitende Technisierung am Arbeitsplatz, im Haushalt und in Freizeitaktivitäten zu einer ständig steigenden allgemeinen Lärmbelästigung geführt. Die Folge sind Konzentrations- und Schlafstörungen, Schäden am vegetativen Nervensystem, die sich in Form von Magen-, Herz- und Kreislaufschwächen äußern; ferner auch Lärmschwerhörigkeit, die mittlerweile als Berufskrankheit Nr. 1 anerkannt ist.

Seit die Menschheit zur Kenntnis genommen hat, dass Lärm krank machen kann, hat das Interesse an Schallschutz und damit das Interesse an allgemeinen akustischen Problemen sprunghaft zugenommen.

Akustik ist definiert als die Lehre vom Schall und seinen Wirkungen auf den Menschen. Damit Schall von der Entstehungsstelle ans Ohr dringen kann, muss er sich durch die Luft oder auch durch ein anderes Medium ausbreiten. Ist kein Medium vorhanden, ist eine Schallübertragung unmöglich (Vakuum).

Als Schall bezeichnet man mechanische Schwingungen und Wellen. Bei Schallausbreitung in Luft spricht man von Luftschall, in festen Stoffen von Körperschall. In Luft kann sich, weil hier keine Querkräfte übertragen werden können, Schall nur als Longitudinalwellen (Verdichtungswellen) ausbreiten. Die einzelnen Luftteilchen führen dabei in der Schallfortpflanzungsrichtung Schwingungen um ihre Ruhelage aus, wobei die benachbarten Teilchen mit angestoßen werden, so dass eine Ausbreitung des Anstoßes (Schalls) zustande kommt, dessen Geschwindigkeit vom Medium abhängt.

Das menschliche Ohr kann Luftschall im Bereich der Druckschwankungen von $p = 2 \cdot 10^{-5}$ Pa bis $2 \cdot 10$ Pa wahrnehmen. Die untere Grenze der Wahrnehmung (der tiefste Ton) liegt bei etwa 16, die obere Grenze bei ungefähr 20000 Schwingungen pro Sekunde (Hertz). Darunter liegende Schwingungen nennt man <u>Infraschall</u> (Erdbeben, Erschütterungen, Gebäudeschwingungen), darüber liegende Schwingungen nennt man <u>Ultraschall</u> (wichtig für viele physikalische, chemische und biologische Zwecke). Je größer die Zahl der Schwingungen in der Sekunde ist, desto höher empfinden wir den Schall.

A2-1 Introduction

Starting in the middle of this century, the steadily increasing population density, the rushing motorisation and the advancing mechanisation of workplaces, in households and in leisure activities have led to a continuously increasing general noise exposure. The consequences are concentration and sleep disturbances, damages of the vegetative nervous system which materialise in the form of stomach, heart and circulatory debilities, and also noise deafness, which has been recognised as the occupational disease No. 1.

Since mankind knows that noise causes disease, the interest in questions of noise protection and thereby the interest in acoustical problems generally has increased desultorily.

Acoustics has been defined as the science of sound and its influence on human beings. That sound should be able to travel from its source to the human ear, it is required that it is able to travel through air or other media. In the absence of any medium (vacuum), sound propagation is impossible.

Mechanical vibrations and waves are called sound. The propagation of sound in the air is called airborne sound, the progress in solid material is called structure-borne sound. In air, sound can only expand in the form of longitudinal waves (compression waves), since here no lateral forces can be transmitted. The individual air particles execute vibrations around their static position in the direction of the sound propagation. Neighbouring particles are hit in this process so that the propagation of the impact (the sound) occurs, the speed of which is dependent upon the medium.

The human ear is able to register airborne sound in the range of pressure changes between $p = 2 \cdot 10^{-5}$ Pa and $2 \cdot 10$ Pa. The lower limit of recognition (the deepest tone) is near 16, the upper limit near roughly 20000 vibrations per second (Hertz). Vibrations below that range are called <u>infrasonic sound</u> (earthquakes, concussions, building vibrations). Vibrations above that range are called <u>ultrasonic sound</u> (important for many physical, chemical and biological purposes). The higher the number of vibrations per second, the higher we recognise the sound.

Die Erzeugung von Luftschall, die Abstrahlung und Ausbreitung von Longitudinalwellen (Verdichtungswellen) als Konsequenz der Vibration eines Körpers bzw. einer Oberfläche sind im Bild 1 dargestellt. Dem Gebiet hohen Drucks in der Nähe der Oberfläche, welches mit der Frequenz f vibriert, folgen Gebiete niedrigeren und höheren Drucks abwechselnd im Abstand der Wellenlänge, die wiederum auf der Schallgeschwindigkeit c und der Frequenz f beruht.

The creation of airborne sound, the emission and propagation of longitudinal waves (compression waves) as a consequence of the vibration of a body, respectively its surface are shown in Figure 1. The high pressure area near a surface, vibrating at the frequency f, is followed by areas of lower and higher pressure consecutively in the distance of the wavelength, which depends upon the speed of sound c and the frequency f.

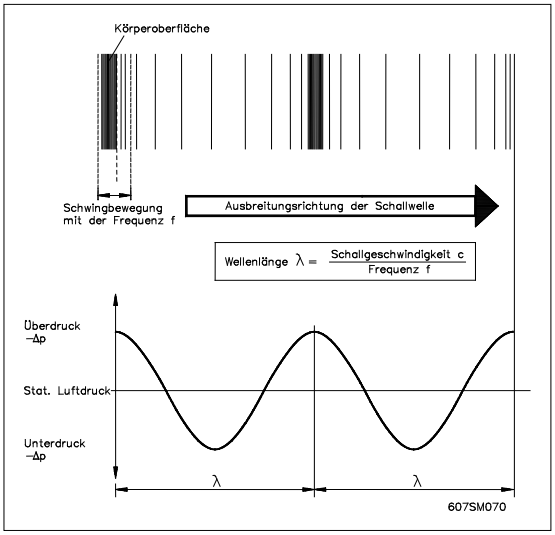


Bild 1: Abstrahlung einer ebenen Schallwelle von einer schwingenden Körperoberfläche

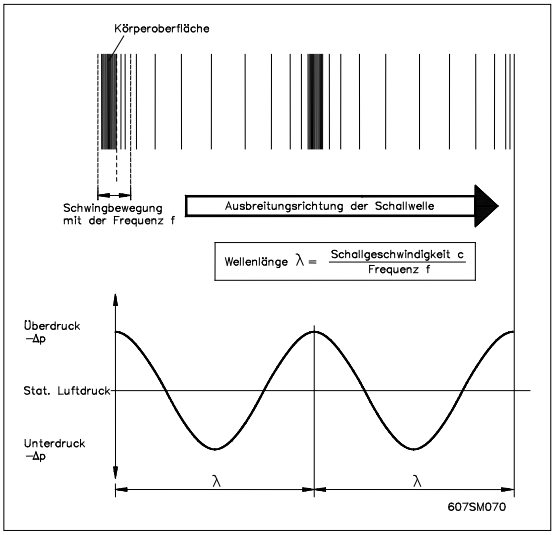


Figure 1: Emission of a flat sound wave from a vibrating solid surface

A2-2 Einordnung und Einteilung

In den folgenden Ausführungen wird auf die Teilgebiete Bau- und Raumakustik sowie der Technischen Akustik mit Luft- und Körperschall im Bereich des hörbaren Frequenzbereichs näher eingegangen. Zum allgemeinen Überblick, wie weitläufig das Gebiet der Akustik ist, werden einige andere wichtige Anwendungsgebiete der Akustik aufgezählt werden (siehe Tabelle 1).

A2-2 Classification

In the following elaborations, the areas of building and room acoustics and of technical acoustics with airborne and structure-borne sound in audible frequency areas are more closely explained. To give a general overview over the vast extent of the field of acoustics, some other important areas of application of acoustics are listed below (see Table 1).

Teilgebiet der Akustik *Area of acoustics*	Verwandte Gebiete *Neighbouring areas*	Inhalte und Aufgaben *Contents and tasks*
Bauakustik ***Building acoustics***	**Architektur, Baustoffkunde** ***Architecture, building material characteristics***	**Schalldämmung, Schalldämpfung und Schallabsorption von Bauteilen und Bauteilkombinationen, Schutz des Menschen in Gebäuden vor vermeidbarem fremden Lärm, Optimierung der akustischen Verhältnisse in Räumen entsprechend ihrer Zweckbestimmung** ***Sound insulation, attenuation and sound absorption of building components and building component compositions, protection of men and buildings from avoidable foreign noise, optimisation of acoustic conditions in rooms according to their purpose***
Bioakustik *Biological acoustics*	Biologie *Biology*	Akustisches Verhalten von Menschen und Tieren *Acoustic behaviour of humans and animals*
Elektroakustik *Electrical acoustics*	Elektrotechnik, Elektronik *Electro-technique, electronic*	Aufnahme, Speicherung und Wiedergabe von Schallereignissen, Entwicklung von Mikrofonen und Lautsprechern *Reception, storage and reproduction of sound, development of microphones and loudspeakers*
Musikalische Akustik *Musical acoustics*	Musik, Instrumentenbau, Elektroakustik *Music, instrument construction, electro-acoustics*	Musikalisches Hörempfinden, Klanganalyse und Abstrahlcharakteristiken von Musikinstrumenten, synthetisches Nachbilden von Instrumentenklängen *Musical sound perception, sound analysis and emission characteristics of musical instruments, synthetic reproduction of instrument sounds*
Strömungsakustik *Flow-field acoustics*	Strömungslehre *Fluid dynamics*	Schallerzeugung und Schallausbreitung in strömenden Medien *Sound production and sound propagation in flowing media*
Physikalische Akustik *Physical acoustics*	Physik allgemein, Mathematik *General physics, mathematics*	Physikalische Grundlagen der Akustik, Mathematik des Schallfeldes, Abstrahlung von Schallquellen, Ausbreitung von Schallwellen *Physical principles of acoustics, mathematics of sound areas, radiation from sound sources, propagation of sound waves*
Physiologische Akustik *Physiological acoustics*	Medizin *Medicine*	Wirkungsweise des menschlichen Ohrs, Untersuchung von Hörschäden, Lärmschwerhörigkeit *Operation of the human ear, investigation of auditory damages, noise-induced hearing loss*

Teilgebiet der Akustik *Area of acoustics*	Verwandte Gebiete *Neighbouring areas*	Inhalte und Aufgaben *Contents and tasks*
Psychologische Akustik *Psychological acoustics*	Medizin, Psychologie *Medicine, psychology*	Reizverarbeitung im menschlichen Nervensystem, Lautstärke-, Tonhöhe-empfinden, Richtungshören, Wirkung akustischer Reize auf den gesamten Organismus *Processing of stimulation in the human nerve system, loudness level, tone height perception, direction hearing, effect of acostic stimuli on the entire organism*
Raumakustik ***Room acoustics***	**Architektur, Musik, Bauakustik, psychologische Akustik** ***Architecture, music, building acoustics, psychological acoustics***	**Gehörmäßige Beurteilung von großen Räumen für musikalische und/oder sprachliche Darbietungen, Sicherstellung optimaler akustischer Verhältnisse beim Neubau solcher Räume** ***Assessment of audio characteristics of large rooms for musical and/or linguistic performances, ensurance of optimal acoustic conditions in the construction phase of such rooms***
Technische Akustik ***Technical acoustics***	**Bauakustik, Technik allgemein** ***Building acoustics, technology in general***	**Schalldämmung, Schalldämpfung und Schallabsorption des Lärms von Maschinen, Armaturen, Industrieanlagen, Schutz des Menschen am Arbeitsplatz und in Wohnungen vor unzumutbarem Lärm** ***Sound insulation, sound attenuation and sound absorption by machines, fittings, industrial installations, protection of man at the workplace and in homes against unacceptable noise***

Tabelle 1: Gebiete der Akustik; die grau hinterlegten Gebiete werden in den Folgekapiteln bzw. Folgedokumenten besprochen

Table 1: Areas of acoustics; grey-shaded parts to be discussed in subsequent chapters, respectively acoustical documents

A2-2.1 Schallempfindung

Wie wir alle wissen, ist die Empfindung von Schall sehr subjektiv. Nicht jeder Schall wird als Lärm empfunden.

- Wohlklang ohne Einschränkung stellt sicher ein Klavierkonzert von Beethoven dar, dem man in entsprechender Atmosphäre lauschen kann.
- Wohlklang für Eingeweihte bietet sich etwa jenen, die sich durch Stevie Wonder oder AC/DC „anturnen“ lassen.
- Wohlklang für wenige „Auserwählte“ schließlich ist der Sound eines gerade beschleunigenden schweren Motorrads.
- Ein Presslufthammer verbreitet schlicht Lärm – viel Lärm!

Um Schall zu empfinden, benötigt man einen „Schallempfänger“. Unter einem Schallempfänger versteht man im technischen Sinn ein Mikrofon, im biologischen Sinn das Ohr. Alle Schallempfänger sind Energiewandler, d. h. sie formen die mechanische Energie des Schallfeldes in elektrische Energie um. Im Folgenden wird der Versuch unternommen, den überaus komplizierten Aufbau und die Funktionsweise des Ohrs zu beschreiben.

Das menschliche Ohr (Bild 2) besteht aus dem äußeren Ohr, dem Mittelohr und dem inneren Ohr. Die Ohrmuschel dient der Aufnahme der Schallwellen (Schalltrichter) und deren Weiterleitung in den Gehörgang, wo sie im Bereich von 2 kHz bis 4 kHz durch Resonanzeffekte der Luftsäule verstärkt werden. Der Gehörgang wird durch das Trommelfell gegen das Mittelohr abgeschlossen. Das Trommelfell ist eine dünne, nachgiebige Membran, die durch Druckschwankungen in Schwingung versetzt wird.

Im Mittelohr wirken die drei Gehörknöchelchen Hammer, Amboss und Steigbügel als mechanische Übersetzung. Sie übertragen und verstärken die Auslenkung des Trommelfells auf das ovale Fenster (am Ende des Steigbügels). Das Mittelohr steht durch die Ohrtrompete (Eustachische Röhre) mit dem Nasen-Rachen-Raum und damit der Außenwelt in Verbindung. Durch diese Verbindung kann der statische Druck im Mittelohr immer wieder (z. B. beim Schlucken) dem Außenluftdruck angeglichen werden.

A2-2.1 Sound sensation

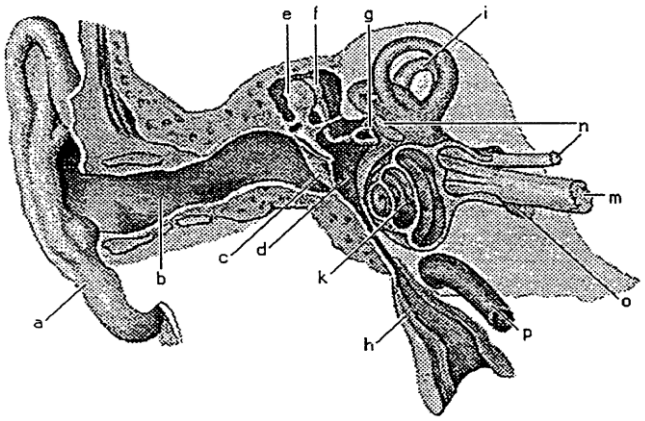
We all know that the sound sensation is very subjective. Not every sound is perceived as noise.

- A piano concert by Beethoven certainly represents melodious sound without restriction, to be listened to in an appropriate atmosphere.
- Melodious sound for the inaugurated is perceived by those who allow themselves to be “turned on” by Stevie Wonder or AC/DC.
- Harmonious sound for the “happy few” may be the sound of an accelerating heavy motorbike.
- A pneumatic hammer produces noise – just much noise!

For the sound sensation, a “sound receiver” is required. A sound receiver in the technical sense is a microphone, in the biological sense an ear. Artificial sound receivers are transformers of energy, i. e. they transform the mechanical energy of the sound field into electrical energy. An explanation of the very complicated construction and way of functioning of the ear is attempted below.

The human ear (Figure 2) consists of the outer ear, the medium ear and the inner ear. The auricle serves the reception of sound waves (sound trumpet) and their transmission into the auditory canal, where in the area between 2 kHz and 4 kHz it is reinforced by the resonance effects of the air column. The auditory canal is separated from the middle ear by the ear drum. The ear drum is a thin, flexible membrane which is set into vibration by pressure differences.

In the middle ear, three auditory bones, the hammer, the anvil and the stirrup serve the mechanical transmission. They transmit and reinforce the movement of the ear drum onto the oval window (at the end of the stirrup). The middle ear is connected by the ear trumpet (tunnel of Eustachius) with the nose and mouth area and thereby with the ambient atmosphere. Through this connection, the static pressure in the middle ear can repeatedly be adjusted to the ambient air pressure (e. g. whilst swallowing).



a Ohrmuschel; b äußerer Gehörgang; c Trommelfell; d Paukenhöhle; e Hammer; f Amboss; g Steigbügel; h Ohrtrompete; i Bogengang; k Schnecke; m Gehör- und Gleichgewichtsnerv; n Gesichtsnerv; o innerer Gehörgang; p innere Kopfschlagader

a ear trumpet; b outer auditory canal; c ear drum; d tympanic cavity; e hammer; f anvil; g stirrup; h ear trumpet; i elbow canal; k cochlea; m auditory and balance nerve; n facial nerve; o inner auditory canal; p inner head artery

Bild 2: Schematische Darstellung des menschlichen Ohr

Figure 2: Schematic sketch of the human ear

Das Innenohr ist sehr kompliziert aufgebaut. Grob vereinfacht werden die mechanischen Schallreize auf die Innenohrflüssigkeit der röhrenförmigen Schnecke (Cochlea) in Druckschwankungen umgewandelt. In der Schnecke befindet sich die Basilarmembran, an deren Oberfläche sich empfindliche Haarzellen (insgesamt über 30.000) befinden und durch Flüssigkeitsbewegungen zur Verformung gezwungen werden. Die Haarzellen registrieren die Verformung und wandeln sie in Nervenimpulse um, die an das Gehirn weitergeleitet werden, in dem die eigentliche Sinneswahrnehmung des Hörens erfolgt.

The inner ear is very complicated. Very simplified, the mechanical sound sensations on the fluid in the inner ear in the cochlea are transformed into pressure differences. In the cochlea is the basilar-membrane, at the surface of which very sensitive hair cells are positioned (totalling more than 30.000) which are forced into deformation by fluid movements. The hair cells recognise the deformation and transform them into nerve impulses which are passed on to the brain where the actual sensation of hearing takes place.

Im Innenohr befindet sich ferner der Vorhof und die drei Bogengänge, die der Wahrnehmung von Bewegungen des Kopfes und damit des ganzen Körpers dienen. Der Vorhof hat die Funktion der Wahrnehmung der Lage des ruhenden Körpers im Raum.

Also in the inner ear, the vestibule and the three elbow canals are situated, which serve the recognition of movements of the head and thereby of the entire body. The vestibule has the function of recognising the position of the static body in space.

Der Hörbereich (Bild 3) eines jungen, gesunden Menschen recht von 16 Hz (untere Hörgrenze) bis 20.000 Hz (obere Hörgrenze; für 60-jährige 5.000 Hz); er umfasst also etwa 10 Oktaven. Die für uns wichtigsten Teilbereiche sind der bauakustische Bereich von 50 Hz bis 5000 Hz sowie der Bereich der Technischen Akustik von 25 Hz bis 10.000 Hz. Der Hörbereich wird zu niedrigen Schalldrücken durch die Hörschwelle und zu hohen durch die Schmerzgrenze begrenzt. Die Empfindlichkeit des Gehörs bei der Hörschwelle liegt knapp jenseits des Wahrnehmungsvermögens der eigenen Organgeräusche (Herzschlag, Atmung).

The range of hearing (Figure 3) of a young, healthy human being reaches from 16 Hz (lower audibility limit) up to 20.000 Hz (upper audibility limit; for 60-year-old 5.000 Hz); this embraces 10 octaves. The ranges of importance for us are the range for building acoustics from 50 Hz to 5.000 Hz and the range for technical acoustics from 25 Hz to 10.000 Hz. The audible range is limited for low sound pressures through audibility and to high sound pressures through pain. The sensibility of the human ear at the threshold of audibility is just beyond the recognisability of the own organic sound (heartbeat, breathing).

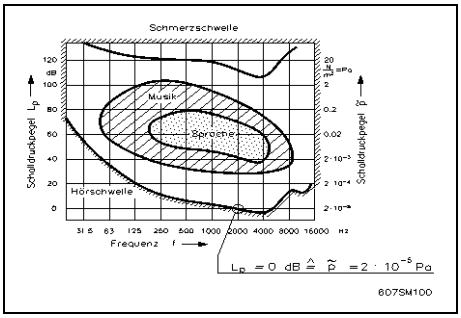


Bild 3: Hörbereich des menschlichen Ohrs[1)]

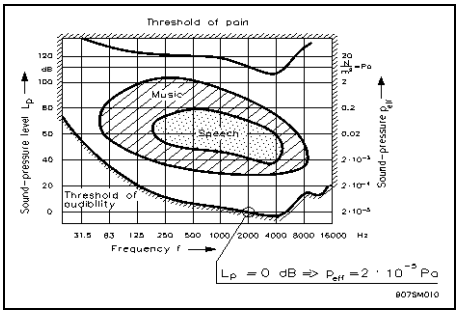


Figure 3: Range of hearing of the human ear[1)]

Lärmquellen mit hoher Leistung (Bild 4) bzw. in großer Anzahl erzeugen oft Geräusche, die im Gefährdungsbereich des menschlichen Gehörs liegen (L_r > 80 – 85 dB(A)). So wird verständlich, dass die Lärmschwerhörigkeit heute an der Spitze der Berufskrankheiten steht.

Sound sources of high volume (Figure 4), respectively in large numbers frequently generate sound that is in the danger area of the human ear (L_r > 80 – 85 dB(A)). Thus, it becomes understandable that noise-induced hearing loss today is at the top of occupational diseases.

---

1) Bereiche sind in dB und dB(A) angegeben, diese Einheiten werden in Kapitel A2-3.4 beschrieben. Die Werte sind als Teile einer Skala zu betrachten.

1) Levels are given in dB and dB(A), these units will be explained in chapter A2-3.4. The values should be considered parts of a scale.

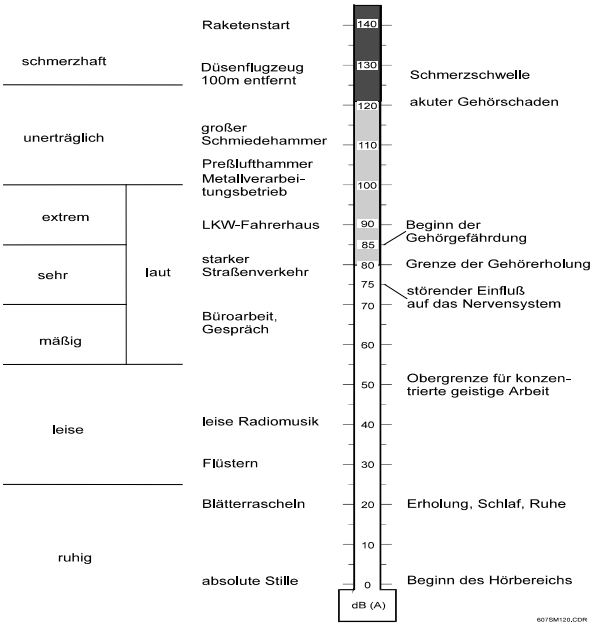


Bild 4: Geräuschsituationen, Empfindung und Wirkung

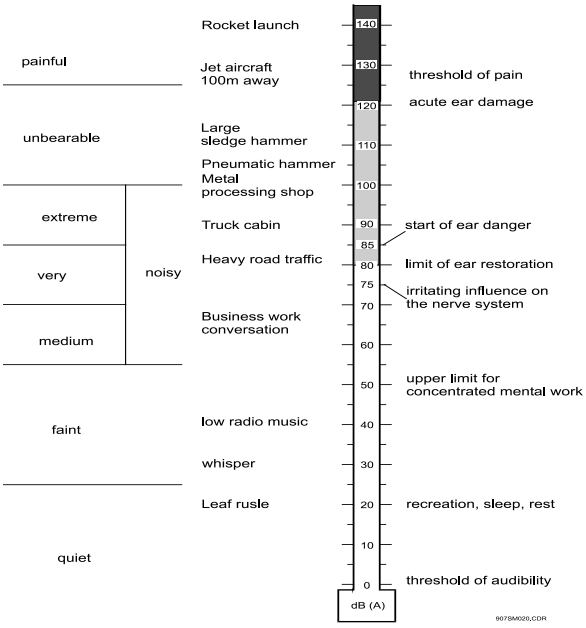


Figure 4: Sound situations, sensation and effect

A2-2.2 Infra-, Hör- und Ultraschall

Außer der nach Kapitel A2-2.1 dargelegten Einteilung der Akustik nach Anwendungsgebieten sind auch Einteilungen nach dem Frequenzbereich denkbar (Tabelle 2).

A2-2.2 Infrasonic, audible and ultrasonic sound

Apart from the division of acoustics according to fields of application explained in chapter A2-2.1, divisions according to frequency areas are also plausible (Table 2).

Schallbereich ***Range of sound***	**Infraschall** ***Infrasonic sound***	**Hörschall** ***Audible sound***	**Ultraschall** ***Ultrasonic sound***
Frequenzbereich *Frequency range*	0 Hz bis / *up to* 16 Hz	16 Hz bis / *up to* 20 kHz	20 kHz bis / *up to* 10 GHz
Schallgeber *Sound emitter*	mechanische Rüttler (Shaker) *mechanical shakers*	mechanisch: Pfeifen, Sirenen, Musikinstrumente elektroakustisch: elektrodynamische und elektromagnetische Lautsprecher *mechanical: pipes, sirens, musical instruments* *electro-acoustical: electrodynamic and electromagnetic loudspeakers*	mechanisch: Pfeifen, Sirenen Pneumatik: elektroakustisch: elektrostriktive, piezoelektrische, elektrostatische Lautsprecher *mechanical: pipes, sirens* *pneumatics: electro-acoustical: electrostrictive, piezo-electric, electrostatic loudspeakers*
Schallaufnehmer *Sound receiver*	piezoelektrische Aufnehmer, Dehnungsmessstreifen *piezo-electric receivers, expansion measurement strips*	Kondensatormikrofon, elektrodynamische, piezoelektrische, piezoresistive Mikrofone *condenser microphone, electro-dynamic, piezo-electric, piezo-resistive microphones*	Kondensatormikrofon, piezoelektrische Mikrofone *condenser microphone, piezo-electric microphones*
Anwendungspraxis *Application practice*	Lagerschwingungen, Körperschall, Bauwerksschwingungsanalyse, Erdbebenwellen *bearing vibrations, structure-borne sound, building vibration analysis, earthquake waves*	Phonotechnik, Schall- und Lärmschutz, Raumakustik, Schwingungsisolierung *audio technique, sound and noise protection, room acoustics, vibration insulation*	Reinigung, Entgasen, Dispergieren, Emulgieren, Polymerisationssteuerung, Ultraschallbearbeitung (Bohren, Schneiden), zerstörungsfreie Werkstoffprüfung Ultraschalldiagnostik (Schwangerschaft), Harnsteinzertrümmerung Modellakustik Diebstahlsicherung *cleaning, degassing, disperging, emulsifying, polymerisation control, ultrasonic sound treatment (drilling, cutting), damage-free material testing* *ultrasonic diagnostics (pregnancy), urinary calculus pulversisation* *model acoustics* *theft protection*

Tabelle 2: Schallbereiche

Table 2: Ranges of sound

A2-2.3 Luft-, Körper- und Wasserschall

Als Schall werden Schwingungen von festen, flüssigen oder gasförmigen Medien bezeichnet, die durch sich zeitlich ändernde Kräfte bzw. beschleunigte Bewegungen ausgelöst werden. Je nach Beschaffenheit des Mediums unterscheidet man zwischen Luftschall, Körperschall und Wasserschall.

Werden feste Körper, die mit Luft in Berührung stehen, zu Schwingungen angeregt, kann unmittelbar Luftschall entstehen (z. B. Lautsprecher, Glocke, etc.). Da in Gasen keine Schubspannungen übertragen werden können, pflanzt sich Luftschall immer nur in Form von Kompressionswellen (oder auch Longitudinalwellen genannt) fort, d. h. die Schwingungsrichtung liegt parallel zur Ausbreitungsrichtung. Dem Luftschall im hörbaren Frequenzbereich kommt hinsichtlich der Einwirkung auf den Menschen im Vergleich zu Körper- und Wasserschall besondere Bedeutung zu. Messgrößen für Luftschall sind in der Praxis vorwiegend der Schalldruck und die Schallschnelle (Intensitätsmessung).

In der Praxis verwendet man den Terminus „Körperschall“ für Schallschwingungen in Festkörpern insbesondere im Hochbau, Fahrzeug- und Maschinenbau vorwiegend im Frequenzbereich des menschlichen Hörens (extrem tieffrequente Körperschallschwingungen werden als Erschütterung bezeichnet). Als Körperschall leitende Elemente kommen z. B. Platten, Stäbe und Wände in Betracht, die bei entsprechender Anregung (z. B. Stoß) außerordentlich komplizierte Schwingungen ausführen.

Die wichtigsten Wellentypen für Körperschall sind Longitudinal- und Biegewellen. Daneben gibt es noch Transversal- (Schubwelle), Torsions-, Quasilongitudinal- und Rayleighwellen (Oberflächenwellen). Longitudinalwellen sind eng mit den Wellen in Gasen und Flüssigkeiten verwandt, da die Bewegung in Ausbreitungsrichtung erfolgt und keine Schubdeformationen auftreten. Longitudinalwellen sind nur dann von unmittelbarem Interesse, wenn der untersuchte Körper, verglichen mit der Wellenlänge, sehr groß ist; sie sind also hauptsächlich für Ultraschallprobleme von Bedeutung.

In der Bauakustik und technischen Akustik hat Körperschall als Ursache und Zwischenstufe für Luftschall große Bedeutung. Körperschall unterscheidet sich von Schall in Gasen und Flüssigkeiten dadurch, dass auch Schubspannungen und Schubdeformationen auftreten können. Es sind daher in Festkörpern nicht nur Kompressionswellen – wie in Gasen und Flüssigkeiten –, sondern auch Kombinationen der Longitudinal- und Transversalwellen möglich.

A2-2.3 Airborne, structure-borne and waterborne sound

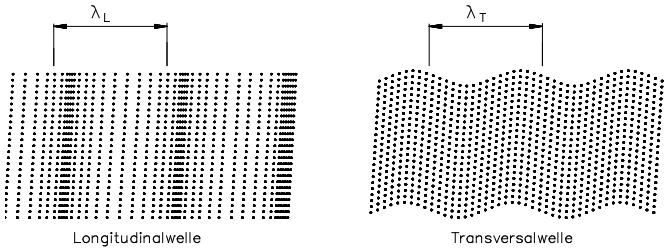
Vibrations of solid, liquid or gaseous media, which are caused by forces changing over time, respectively by accelerating movements, are called sound. Dependent upon the character of the medium, one discerns between airborne, structure-borne and waterborne sound.

Where solid bodies, that are in contact with air, are caused to vibrate, airborne sound can be generated immediately (e. g. loudspeaker, bell, etc.). Since in gases no compression tensions can be transmitted, the airborne sound can only expand in the form of compression waves (also called longitudinal waves), i. e. the direction of vibration is parallel to the direction of expansion. The airborne sound in the audible frequency range is of special importance by comparison to structure-borne or waterborne sound, regarding its influence on humans. In practice, measuring values for airborne sound are predominantly the sound pressure and the sound-particle velocity (measurement of intensity).

In practice, the terminus “structure-borne sound” is used for sound vibrations in solid bodies, especially in building construction and vehicle and machinery engineering, predominantly for the frequency range of human audibility (extremely low frequent structure-borne sound vibrations are called concussions). Elements conducting a structure-borne sound are e. g. boards, levers and walls, which conduct very complicated vibrations once an appropriate impulse (e. g. push) is received.

The most important wave types for structure-borne sound are longitudinal and bending waves. Additionally, transverse, torsion, quasi-longitudinal and Rayleigh waves (surface waves) exist. Longitudinal waves are very similar to the waves in gases and fluids, since the movement is in the direction of the propagation and no propulsion deformations occur. Longitudinal waves are of immediate interest only when the tested structure is very large compared to the wavelength; it is therefore predominantly of importance for ultrasonic sound problems.

In building acoustics and technical acoustics, the structure-borne sound has great importance for the airborne sound as a cause and an intermediate stage. Structure-borne sound is distinct from sound in gases and fluids by the fact that compression tensions and compression deformations can also occur. In solid bodies, therefore, there are not only compression waves which occur – as in gases and fluids –, but also combinations of longitudinal and transverse waves.



longitudinal wave *transverse wave*

Bild 5: Grundlegende Wellentypen in unbegrenzten Medien: Momentbilder der Positionen von Mediumteilchen, die in ihrer Ruhelage ein quadratisches Punktgitter bilden

Figure 5: Principle wave types in unlimited media: Momentary pictures of positions of particles of the medium forming a rectangular point-grid under static conditions

Für die praktische Schalltechnik sind Biegewellen auf Stäben und plattenförmigen Körpern am wichtigsten. In diesem Fall ist die Bewegung senkrecht zur Ausbreitungsrichtung und damit auch zur Plattenoberfläche. Biegewellen neigen daher am ehesten zur Schallabstrahlung. Bild 5 zeigt das momentane „Wellenbild“ einer Longitudinal- und Transversalwelle. Zur Messung von Körperschallvorgängen sind vorwiegend Schwingbeschleunigungsaufnehmer nach dem Piezoprinzip gebräuchlich. Als Messgröße interessiert in erster Linie die Schwinggeschwindigkeit, mit der Bauteile um ihre Ruhelage oszillieren. Die Schwinggeschwindigkeit wird dabei als Schallschnelle bezeichnet.

For practical acoustic engineering, the bending waves on bars and bodies in the form of boards are the most important. In these cases, the movement is vertical to the direction of expansion and thereby to the surface of the board. Bending waves therefore lend themselves most readily to sound emission. Figure 5 shows the momentary “wave picture” of a longitudinal and a transverse wave. For the measurement of structure-borne sound phenomena, predominantly vibration acceleration receivers, working according to the piezo-principle, are in use. As measured value, the vibration speed, with which building components vibrate around their static position, is of foremost interest. This vibration speed is called sound-particle velocity.

Eine spezielle Art von Körperschall ist Trittschall, der insbesondere in Wohngebäuden von Bedeutung ist. Trittschall im engeren Sinn sind die beim Gehen, Laufen, etc. auf Böden und Treppen entstehenden Geräusche; im weiteren Sinn werden auch andere Arten der unmittelbaren Körperschallanregung von Fußböden, Treppen, etc. als Trittschall bezeichnet (Anregung z. B. durch in Betrieb befindliche Waschmaschinen, fallende Gegenstände, etc.). Durch Trittschall werden Biegewellen der Decke erzeugt, die in dem darunter liegenden Raum eine Schallabstrahlung hervorrufen. Für Messzwecke erfolgt die Anregung der Decke durch das standardisierte Hammerwerk nach EN ISO 717-2.

A special sort of structure-borne sound is impact sound which is of special importance in residential buildings. Impact sound in the very meaning of the word are the noises originated through walking, running, etc. on floors and staircases; in a wider sense other forms of immediate creation of structure-borne sound on floors and staircases, etc. are also called impact sound (creation e. g. through operating washing machines, falling objects, etc.). Impact sound creates bending waves in the ceiling, which result in sound emissions in rooms below. For measuring purposes, the stimulus of the ceiling is created by the standardised tapping machine according to EN ISO 717-2.

Ein Teilgebiet der Akustik ist Wasserschall (Hydroakustik), der sich mit Schall im Übertragungsmedium Wasser befasst. Die Lehre vom Wasserschall weist viele Parallelen zum Luftschall auf, da in reibungsfreien Gasen und Flüssigkeiten keine Schubspannungen übertragen werden können. Daher treten ausschließlich Longitudinalwellen auf. Wasserschall spielt für die Bauakustik und technische Akustik eine untergeordnete Rolle und entsteht allenfalls bei Installationsgeräuschen. Das Hauptanwendungsgebiet ist jedoch die Unterwasser-Ortung der militärischen und zivilen Seefahrt.

A special area of acoustics is waterborne sound (hydroacoustics) which concerns itself with the sound in the expansion medium water. The science of waterborne sound has many parallels to airborne sound, since in gases and fluids free of friction no propulsion tensions can be transmitted. Therefore, only longitudinal waves occur. Waterborne sound plays a minor role in building and technical acoustics and occurs, if at all, in noises in the building equipment. The main area of use is however the sub-surface detection in the military and civil navy.

A2-2.4 Schalldämmung und Schalldämpfung

Als Schalldämmung bezeichnet man die Verminderung der Ausbreitung von Luftschall oder Körperschall, vor allem in Bauten durch Reflektion der sich ausbreitenden Schallenergie an einzelnen Unstetigkeitsstellen, z. B. an einzelnen Bauteilen.

Unter Schalldämpfung oder Schallabsorption wird die Umwandlung von Schallenergie in Wärmeenergie z. B. durch Reibung in offenporigen Materialien verstanden

Die Mechanismen, die zur Körperschalldämpfung führen, sind molekulare Versetzungsvorgänge und in geringem Maße Wärmeleitung. Bei Verbindungsstellen von Konstruktionen erfolgt eine Körperschalldämpfung auch durch Reibungsvorgänge und durch Viskositätseffekte in dünnen Zwischenschichten.

A2-2.4 Acoustic insulation and sound attenuation

Acoustic insulation is a term used for the decrease of the expansion of airborne or structure-borne noise, predominantly in buildings, through reflection of the expanding sound energy at individual places or irregularity, e. g. at individual building components.

The term sound attenuation, also sound absorption, is used for the transmission of sound energy into thermal energy, e. g. through friction in open cellular materials.

The mechanisms leading to structure-borne sound attenuation are molecular displacement processes and to a lesser degree thermal conductivity. At connecting points of constructions, a structure-borne sound attenuation results from friction processes and also from viscosity effects in thin immediate layers.

A2-3 Physikalisch-technische Grundlagen

A2-3.1 Frequenz, Schallgeschwindigkeit, Wellenlänge

Eine wichtige Beschreibungsgröße für ein Schallereignis, die sowohl in der Lärmbeurteilung als auch in der Lärmbekämpfung entscheidende Bedeutung besitzt, ist die so genannte spektrale Zusammensetzung, die z. B. etwas über die Tonhöhe oder den Wohlklang eines Geräuschs aussagen kann; ihre maßgebliche physikalische Messgröße ist die Frequenz. Die Frequenz ist definiert als die Anzahl der Schwingungen je Sekunde, die Maßeinheit ist Hertz, abgekürzt Hz.

Das charakteristische Merkmal einer Schwingung ist die ständige Wiederholung gleicher Bewegungsabläufe. Die Zeitspanne, die vergeht, bis ein gleicher Bewegungsvorgang zum ersten Mal wiederkehrt, nennt man die Schwingungsdauer oder Periode T (in Sekunden).

In der technischen Akustik interessieren nur Frequenzen im Bereich 25 < f < 10.000 Hz. In der Bauakustik wird der Frequenzbereich von 50 Hz bis 5.000 Hz berücksichtigt („bauakustischer Frequenzbereich“).

A2-3 Physical, technical basics

A2-3.1 Frequency, speed of sound, wavelength

A true description value for any sound occurrence, which is important as well for the judgement of noise as for the noise suppression, is the so-called spectrum composition which gives information e. g. about the height of a tone or the harmony of a noise; its governing physical measuring value is the frequency. The frequency is defined as the number of vibrations per second, the unity is Hertz, abbreviated Hz.

The characteristic property of a vibration is the perpetual repetition of identical movements. The time span elapsing until the first repetition of the identical movement is called the time of vibration or period T (in seconds).

In technical acoustics, only frequencies in the area between 25 < f 10.000 Hz are of general importance. In building acoustics, the frequency area from 50 Hz to 5.000 Hz is considered (“building acoustical frequency area”).

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit einer Schallwelle, d. h. diejenige Geschwindigkeit, mit der die Welle akustische Informationen in Form von Schallenergie transportiert, wird Schallgeschwindigkeit genannt.

The propagation speed of a sound wave, i. e. that speed with which the wave transports acoustical information in the form of sound energy, is called speed of sound.

Gegenüber der uns sonst aus der Natur bekannten Lichtgeschwindigkeit ist sie um einige Größenordnungen kleiner. Irgendwo entstandener Schall ist nicht wie Licht unmittelbar auch in der näheren, sichtbaren Umgebung vorhanden. Er benötigt dazu einige Zeit, was wir ohne Mühe mit unseren Sinnesorganen feststellen können (Blitz – Donner).

Compared to the speed of light also known from nature, it is smaller by some orders of magnitude. Sound somewhere generated is unlike light not immediately present also in the nearer, visible environment. It requires some time, which we can recognise without effort with our own senses (lightning – thunder).

Aus der Schallgeschwindigkeit c und der Frequenz f ergibt sich die Wellenlänge λ nach folgender Gleichung:

The wavelength λ is given by the speed of sound c and the frequency f by the following equation:

$$\lambda = \frac{c}{f} \qquad (1)$$

Sie kann bei Luftschall unter Normaltemperaturen im hörbaren Bereich zwischen etwa 20 m und 2 cm schwanken. Da die Abmessungen von Räumen, Schallquellen, Empfängern und eventuell vorhandenen Hindernissen auch in dieser Größenordnung liegen können, werden die Ausbreitungsvorgänge von Schallwellen bei unterschiedlichen Frequenzen und somit unterschiedlichen Wellenlängen möglicherweise erheblich voneinander abweichen.

In can vary between 20 m and 2 cm for airborne sound at normal temperatures in the audible area. Since the dimensions of rooms, sound emitters, receivers and obstacles possible present are also in the range of magnitude, the expansion processes of sound waves of differing frequencies and thereby differing wavelengths may possibly be very different.

Zur Berechnung von c bei anderen Temperaturen und Drücken dient die Gleichung

For the calculation of c at other temperatures and air pressures, the following equation serves

$$c = \sqrt{\kappa \cdot p_{stat.}\left[N/m^2\right]} / \rho_{Betr.}$$ [2)]

$$\rho_{Betr.} = \frac{\rho_n \cdot p_{Betr.} \cdot \theta_n}{p_n \cdot \theta_{Betr.}}$$

Gas	κ	ρ_n [kg/m^3]	c [m/s]
Argon	1,67	1,60	323
Ethylen *ethylene*	1,24	1,18	330
Azetylen *ethetylene*	1,23	1,1	327
Chlor *chlorine*	1,34	3,01	213
Helium	1,66	0,167	1005
Kohlendioxid *carbon dioxide*	1,31	1,85	268
Kohlenmonoxid *carbon monoxide*	1,4	1,17	350
Luft *air*	1,4	1,21	340 (= c_0)
Methan *methane*	1,3	0,66	445
Neon	1,67	0,84	446
Sauerstoff *oxygen*	1,4	1,34	326
Schwefeldioxid *sulphur dioxide*	1,4	2,75	224
Schwefelwasserstoff *hydrogen sulphide*	1,3	1,44	300
Stickstoff *nitrogen*	1,4	1,17	337
Wasserstoff *hydrogen*	1,4	0,084	1310

Dichte bei 20 °C und 1 bar
Density at 20 °C and 1 bar

2) Zur Erklärung von Symbolen und Einheiten siehe Kapitel A2-6.
For the description of symbols and units, see chapter A2-6.

Flüssigkeiten *Fluids*	ρ_n [kg/m^3]	c [m/s]
Benzin *petrol*	750	1190
Aceton *acetone*	790	1190
Ethylalkohol *ethylene alcohol*	790	1150
Ethylether *ethylene ether*	710	1006
Benzol *benzene*	870	1326
Glyzerin *glycerine*	1260	1950
Methylalkohol *methylene alcohol*	790	1120
Salzsäure *hydrochloric acid*	908	1500
Seewasser* *sea water**		1540
Tuluol	866	1325
Wasser (destilliert) *water (distilled)*	1000	1492

* bei ϑ [°C] Temperatur in d [m] Tiefe gilt:
** at ϑ [°C] temperature in d [m] depth, the following applies:*

$$c = 1449 + 4{,}6\,\vartheta - 0{,}055\,\vartheta^2 + 0{,}017\,d$$

Feststoffe *Solid materials*	ρ_n [kg/m^3]	c [m/s]
Aluminium	2700	5200
Blei *lead*	11300	1250
Eis *ice*	920	3200
Gipskartonplatte *gypsum board*	1200	2400
Glas *glass*	2500	4900
Granit *granite*	2800	6400
Gummi (weich) *rubber (soft)*	1000	≈ 45
Hartfaserplatte *rigid fibre board*	600 – 700	2700
Holz *wood*	400 – 800	2000 - 3000
Kork *cork*	200	500
Leichtbeton *lightweight concrete*	1300	1700
Schwerbeton *heavyweight concrete*	2300	3400
Stahl *steel*	7800	5000
Ziegel *tiles*	1100 – 1900	2500 – 3000

Tabelle 3: Schallgeschwindigkeit und Dichte in verschiedenen Gasen, Flüssigkeiten und Feststoffen

Anmerkung: Wegen der Vergleichbarkeit mit Gasen und Flüssigkeiten wurde bei Feststoffen die Geschwindigkeit c_L der Longitudinalwellen (Kompressionswellen) angegeben. Für die praktische Schalltechnik ist die Geschwindigkeit c_B der Biegewellen auf plattenförmigen Körpern (Blechen) von größerer Bedeutung. Da c_B von der Materialstärke abhängt, wird auf die Angabe von Zahlenwerten verzichtet.

Table 3: Speed of sound and density in different gases, fluids and solid materials

Note: Because of comparability with gases and fluids, for solid materials the speed c_L of the longitudinal waves (compression waves) have been given. For practical acoustics, the speed c_B of bending waves of board-shaped bodies (sheets) is of higher importance. Since c_B is dependent upon the thickness of the material, no nominal values have been given.

A2-3.2 Ton, Klang, Geräusch, Rauschen, Knall

In den seltensten praktischen Fällen wird es möglich sein, ein Schallereignis einer einzigen Frequenz zuzuordnen; meist hat man es mit einem Gemisch von Beiträgen unterschiedlicher Frequenz zu tun (Bild 6). Die frequenzmäßige (spektrale) Zusammensetzung entscheidet über die Zugehörigkeit zu einem der nachfolgenden Abschnitte.

A2-3.2 Tone, complex total sound, noise, random noise, bang

Only in rare cases of practical application it will be possible to identify the occurrence of a noise with one single frequency; most frequently the noise is a composition of differing frequencies (Figure 6). The frequency-dependent (spectral) composition is important for the affiliation to one of the following chapters.

Ton
Enthält ein Schallereignis nur eine einzige Frequenz, so bezeichnet man dieses als Ton, reinen Ton oder Sinuston. Natürliche Schallquellen senden immer Frequenzgemische aus; reine Töne im akustischen Sinn können nur mit Hilfe von so genannten Sinusgeneratoren erzeugt werden.

Klang
Liegt ein Tongemisch vor, bei dem die Frequenzen der einzelnen Teiltöne in einem ganzzahligen Verhältnis zueinander stehen, so spricht man von einem Klang. Bei Klang liegen neben einer Grundschwingung mehrere Teilschwingungen vor, deren Frequenzen sich harmonisch zur Grundschwingung verhalten, also wie ganzzahlige Vielfache von dieser. Die Frequenzzusammensetzung eines Klangs besteht aus der Grundfrequenz (z. B. 200 Hz) und den harmonischen Frequenzen (400, 600, 800 Hz, usw.). Im musikalischen Sinn erklingt dann gerade ein Ton (Grundton plus Obertöne). In der Akustik entspricht das dem Klanggemisch. Ein „Ton“ im musikalischen Sinn ist also für den Akustiker ein Klang, und der „Klang“ des Musikers ist akustisch in der Regel ein Klang mit komplizierter Zusammensetzung.

Geräusch
Stehen die Frequenzen eines Schallereignisses in keinem ganzzahligen Verhältnis zueinander, spricht man in der Akustik von einem Geräusch, falls störend, von Lärm. Geräusche sind die in der Praxis am häufigsten auftretenden Schallsignale. Sie können durch unterschiedliche Vorgänge entstehen, und zwar meistens durch Wirbelbildung in Gas- oder Flüssigkeitsströmungen (Strömungsgeräusch) oder durch Schwingungsanregung von Festkörpern (z. B. durch Blechschwingungen). Die Störwirkung von Geräuschen ist quantitativ schwer zu erfassen, da bei der Empfindung der Belästigung durch Geräuschimmission subjektive Faktoren (etwa die persönliche Einstellung zur Geräuschquelle, die physische und psychische Verfassung des Einzelnen, etc.) eine erhebliche Rolle spielen.

Weißes Rauschen
Rauschen ist ein Schallereignis, dessen Schallenergiedichte über den interessierenden Frequenzbereich konstant ist (nach DIN 1320). Die entsprechenden Terz- oder Oktavpegel steigen daher um 3 dB je Oktave an. Für den menschlichen Hörbereich bedeutet dies ein Geräusch, das alle Frequenzen von 16 Hz bis 16.000 Hz zu gleichen Anteilen enthält. Gehörmäßig entspricht es etwa dem Geräusch, das ein Fernsehgerät oder Radio abstrahlt, wenn man zwischen zwei Sendern ist.

Rosarauschen
Bei Rosarauschen sind die Terz- bzw. Oktavpegel bei allen Frequenzen konstant, d. h. die Schallenergiedichte fällt nach hohen Frequenzen hin ab. Im Vergleich mit weißem Rauschen nimmt man Rosarauschen subjektiv etwas tieffrequenter wahr.

Knall
Ein Knall ist ein kurzzeitiger Schallstoß von meist großem breitbandigem Schalldruck. Es gibt sehr viele Arten von Knallen, z. B. den Überschallknall oder den Explosionsknall. Dabei enthalten derlei Knalle in einem breiten Frequenzband sehr hohe Schalldruckpegel, so dass es bei wiederholter Einwirkung zu schwerwiegenden Hörverlusten kommen kann.

Tone
If a sound consists of only one frequency, it is called a tone, pure tone or sinusoidal tone. Natural sound emitters always emit frequency compositions; pure tones in an acoustical sense can only be generated with the help of the so-called sine wave generator.

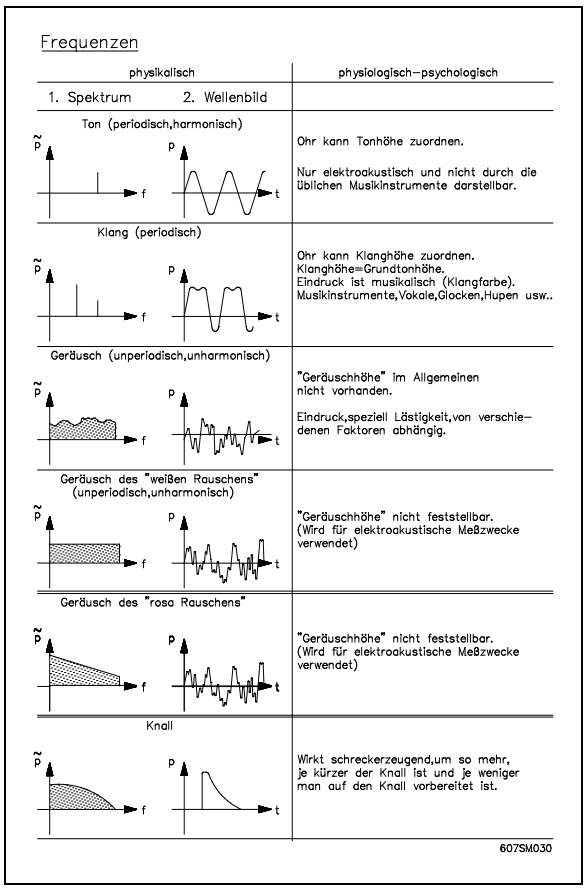
Complex total sound
In case of a composition of tones, where the relation of the frequencies of the individual tones is one of integer numbers, the composition is called a complex total sound. In the complex total sound, there occur next to the basic vibration several partial vibrations, the frequencies of which are in harmony with the basic vibration that is a integer number multiplication of it. The frequency composition of a complex total sound consists of the basic frequency (e. g. 200 Hz) and the harmonious frequencies (400, 600, 800 Hz, etc.). In a musical sense, this constitutes a tone (basic tone plus over-tones). In an acoustical sense, this is a sound composition. A “tone” in a musical sense is thus for the acoustic engineer a complex total sound, and the “harmonious sound” of the musician is acoustically normally a complex total sound of a complicated composition.

Noise
If the frequencies of an occurring sound do not have an integer number relation to each other, one speaks in acoustics of a noise, if irritating, of noise pollution. In practical life, noises are the most frequently occurring sound signals. They can be generated by different events, most frequent is their generation through the formation of commotions in flowing gases or fluids (flowing noise) or through the creation of vibrations in solid bodies (e. g. through vibrations in sheets). The irritating effect of noises is difficult to gauge quantitatively since the sensation of irritation through noise emissions is influenced considerably by subjective factors (i. e. the personal attitude towards the source of noise, the physical or psychological mode of individuals, etc.).

White random noise
Random noise is a sound occurrence, the sound energy of which is constant over the frequency area of interest. The associated third-octave or octave levels therefore increase by 3 dB per octave. For the human hearing range, this means a sound composed of equal amounts of all frequencies from 16 Hz to 16.000 Hz. This is roughly the sort of noise emitted by a television set or a radio receiver when the adjustment is between two emitter stations.

Pink random noise
With pink random noise, the third-octave or octave levels are constant for all frequencies, that is the density of sound energy decreases with higher frequencies. By comparison to the white random noise, the pink random noise is perceived subjectively as slightly lower frequential.

Bang
A bang is a short-time sound thrust of frequently high sound pressure level in a broad frequency band. There are many forms of bangs, e. g. the supersonic bang or the explosion bang. Repeated subjections to bangs may lead to severe hearing damages.



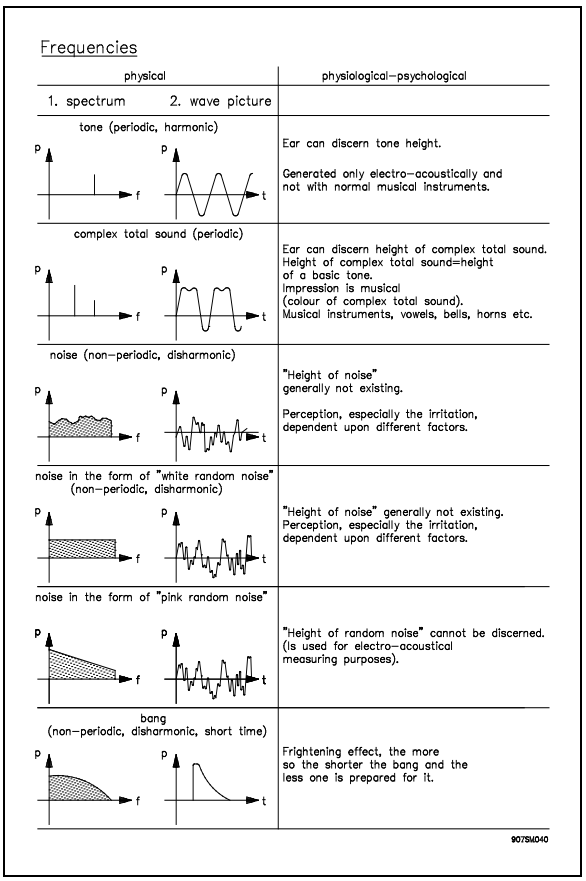


Bild 6: Charakteristische Schallspektren im Schalldruck-Frequenz-Verlauf bzw. Amplituden-Zeit-Verlauf

Figure 6: Characteristic sound spectra in the sound level-frequency-course respectively in the amplitude-time-course

A2-3.3 Frequenzanalyse (Filter, Terzen, Oktaven)

Für Untersuchungen, z. B. der Geräuschentstehung bei Maschinen, der Schallabstrahlung, der Schallausbreitung im Freien, in Räumen oder der Schallübertragung über Wände und Decken, ist häufig die Kenntnis des Gesamtschalldruckpegels allein nicht ausreichend, sondern es sind detaillierte Informationen, speziell über die im Geräusch enthaltenen Frequenzanteile, erforderlich. Diese werden durch eine Frequenzanalyse, d. h. durch die Zerlegung des Geräuschs in seine Frequenzanteile, gewonnen. Je nach Breite der Frequenzbereiche (Bandbreite), in die das Geräusch zerlegt wird, erhält man Oktav-, Terz- oder Schmalbandspektren.

Oktav- und Terzfilter haben eine relative Bandbreite, d. h. das Verhältnis der oberen zur unteren Grenzfrequenz des Durchlassbereichs ist ein konstanter Wert. Bei Oktavfiltern beträgt dieses Verhältnis 2 : 1, bei Terzfiltern $\sqrt[3]{2:1}$ (siehe Tabelle 4).

Um unnötige Verwirrung durch allzu große Willkür zu vermeiden und unterschiedliche Messergebnisse besser miteinander vergleichen zu können, sind von ISO (International Standardization Organization) bevorzugte Breiten (Terzen und Oktaven) sowie bevorzugte Mittenfrequenzen der Einzelbereiche festgelegt worden.

A2-3.3 Frequency analysis (filter, third-octaves, octaves)

For investigations, e. g. the noise generation in machines, the sound emissions, the sound propagation in the open, in rooms and the sound transmission via walls and ceilings, frequently the knowledge of the overall sound pressure level alone is not sufficient, but more detailed information is required, especially regarding the different frequency shares present in the noise. These are obtained through a frequency analysis, i. e. through the division of the noise in its individual frequency shares. Dependent upon the width of the frequency ranges (width of band) into which this noise is divided, one obtains octave, third-octave or narrow-band spectra.

Octave and third-octave filters have a relative band width, i. e. the relation between the upper and lower limit frequency of the emitted area is a constant value. With octave filters, the relation is 2 : 1, for third-octave filters $\sqrt[3]{2:1}$ (see Table 4).

To avoid unnecessary confusion through excessive arbitrariness and to be able to compare different test results with each other, ISO (International Standardization Organization) has defined preferred bandwidths (third-octaves and octaves) as well as preferred middle frequencies of the individual bands.

Oktave *Octave*				Terz *Third-octave*			
f_1	f_m	f_2	A-Kurve *A curve*	f_1	f_m	f_2	A-Kurve *A curve*
Hz	**Hz**	Hz	**dB**	Hz	**Hz**	Hz	**dB**
11	**16**	22	**-56,7**	11 14,1 17,8	**12,5** **16** **20**	14 17,8 22,4	**-63,4** **-56,7** **-50,5**
22	**31,5**	44	**-39,4**	22,4 28,2 35,5	**25** **31,5** **40**	28,2 35,5 44,7	**-44,7** **-39,4** **-34,6**
44	**63**	88	**-26,2**	44,7 56,2 70,7	**50** **63** **80**	56,2 70,7 89,1	**-30,2** **-26,2** **-22,5**
88	**125**	177	**-16,1**	89,1 112 141	**100** **125** **160**	112 141 178	**-19,1** **-16,1** **-13,4**
177	**250**	355	**-8,6**	178 224 282	**200** **250** **315**	224 282 355	**-10,9** **-8,6** **-6,6**
355	**500**	710	**-3,2**	355 447 562	**400** **500** **630**	447 562 708	**-4,8** **-3,2** **-1,9**
710	**1000**	1420	**0**	708 891 1122	**800** **1000** **1250**	891 1122 1413	**-0,8** **0** **+0,6**
1420	**2000**	2840	**+1,2**	1413 1778 2239	**1600** **2000** **2500**	1778 2239 2818	**+1,0** **+1,2** **+1,3**
2840	**4000**	5680	**+1,0**	2818 3548 4467	**3150** **4000** **5000**	3548 4467 5623	**+1,2** **+1,0** **+0,5**
5680	**8000**	11360	**-1,1**	5623 7079 8913	**6300** **8000** **10000**	7079 8913 11220	**-0,1** **-1,1** **-2,5**
11360	**16000**	22720	**-6,6**	11220 14130 17780	**12500** **16000** **20000**	14130 17780 22390	**-4,3** **-6,6** **-9,3**

Tabelle 4: Oktav- und Terzbereiche der technischen Anwendungen

Anmerkung: Terzspektren von Geräuschen haben immer geringere Werte als die dazugehörigen Oktavspektren. Drei Terzen bilden eine Oktave.

Schmalbandfilter können sowohl relative als auch absolute Bandbreiten besitzen. Die Bandbreite ist mit modernen FFT-Analysatoren auch im Bereich von wenigen mHz einstellbar. Sie erlauben ein genaues Erkennen von Einzeltönen oder schmalbändigen Pegelspitzen im Gesamtgeräusch. Ein Vergleich der messtechnisch ermittelten Einzeltöne mit rechnerisch bestimmten Arbeitsfrequenzen einer Maschine, z. B. den Zahneingriffsfrequenzen eines Getriebes oder der Drehklang eines Ventilators, gibt Hinweise auf die gesuchte Geräuschanregung.

Bild 7 zeigt die mit unterschiedlicher Bandbreite gemessenen Spektren des von einer Maschine abgestrahlten Geräuschs. Deutlich ist zu erkennen, dass mit zunehmender Bandbreite der Frequenzanalyse der Informationsgehalt des Spektrums abnimmt. Tonale Komponenten im Geräusch (hier oberhalb 1 kHz) sind praktisch nur mittels einer Schmalbandanalyse auffindbar.

Ein Vergleich zweier Spektren, die mit Filtern unterschiedlicher Bandbreite ermittelt wurden, ist – wie aus Bild 7 ersichtlich – nicht möglich. Zwecks Vergleich ist das schmalbandigere Spektrum in das breitbandigere umzurechnen, indem alle Frequenzanteile des schmalbandigeren Spektrums, die im breitbandigeren Frequenzbereich enthalten sind, energiemäßig zusammengefasst werden. Durch energiemäßige Zusammenfassung aller Frequenzanteile erhält man den Gesamtschalldruckpegel.

Table 4: Octave and third-octave areas in technical applications

Note: Third-octave spectra of noises have a lower value than the associated octave spectra. Three third-octaves form one octave.

Narrow-band filters can possess relative as well as absolute bandwidth. The bandwidth can be adjusted with modern FFT analysers, even in the range of a few mHz. They allow for the exact determination of individual tones or narrow-band level peaks in the noise composition. A comparison of the individual tones identified with measurements with the working frequencies of a machine calculated mathematically, e. g. tooth-engagement frequencies of a gear box or the tuning noise of a ventilator, render information regarding the sought noise stimulation.

Figure 7 shows the spectra measured with different bandwidth of the noise emitted by a machine. One can clearly see that with increasing bandwidth of the frequency analysis the amount of information of the spectrum decreases. Harmonious components in the noise (in this case above 1 kHz) can practically only be detected with a narrow-band analysis.

A comparison of two spectra, that have been detected with filters of different bandwidth, is – as demonstrated in Figure 7 – impossible. For comparison, The narrow-band spectrum must be mathematically transformed into the wider-band spectrum by adding up the energy contained in all frequency shares of the narrow-band spectrum, which are contained in the wider-band frequency range. Through the addition of the energy contained in all frequency shares, the overall sound pressure level is obtained.

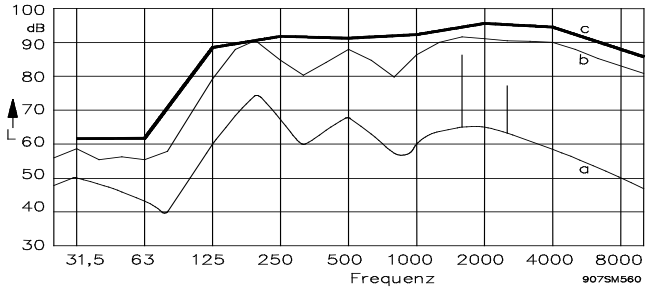


Bild 7: Einfluss des Filtertyps auf das Schalldruckpegelspektrum: a Schmalbandanalyse (Δf = 1 Hz), b Terzbandanalyse, c Oktavbandanalyse

Figure 7: Influence of the filter used on the sound pressure level spectrum: a narrow-band analysis (Δf = 1 Hz), b third-octave band analysis, c octave-band analysis

A2-3.4 Schallpegel

Die am einfachsten zu messende Beschreibungsgröße bei der in der technischen Akustik wichtigsten Schallart – dem Luftschall – ist der Schalldruck, Maßeinheit N/m^2 = Pa. Da es sich dabei um rasch wechselnde Werte in der Nähe des atmosphärischen Drucks handelt (Bild 8), benutzt man den Mittelwert der Druckänderungen als Schalldruck. Statt des Schalldrucks könnte man auch die Schallschnelle zur Beschreibung der Schallstärke verwenden. Das ist die kleine Wechselgeschwindigkeit, mit der Volumenelemente in der Luft hin und her bewegt werden, Maßeinheit m/s.

Das bekannteste Gerät zur Messung von Druckänderungen in Luft ist das Barometer. Diese Druckänderungen, die mit wechselndem Wetter eintreten, sind für das menschliche Ohr viel zu langsam, als es sie wahrnehmen könnte. Wenn sich aber diese Änderungen im atmosphärischen Druck schneller ereignen – mindestens 20 Mal pro Sekunde – kann man sie hören. Sie werden dann Schall genannt. Ein Barometer kann nicht schnell genug reagieren und ist deshalb zum Messen von Schall ungeeignet.

A2-3.4 Sound levels

The most readily obtained characterising property of airborne sound, the most important type of sound in technical acoustics, is the sound pressure, unit is N/m^2 = Pa. Since the values are fast changing values in the vicinity of atmospheric pressure (Figure 8), the average value of the pressure changes is used as sound pressure. Instead of the sound pressure, also the sound-particle velocity could be used to describe the force of a sound. This is the small speed of change with which volume particles in the air oscillate, the unit is m/s.

The best known instrument for the measurement of pressure changes in the air is the barometer. The pressure changes, occurring with changing weather, are much too slow for the human ear to recognise. When the changes in atmospheric pressure occur faster – at least 20 times per second – they become audible. They are then called sound. A barometer cannot react fast enough and is therefore unfit for the measurement of sound.

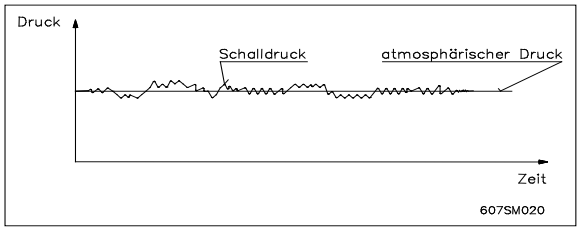


Bild 8: Schalldruckschwankung

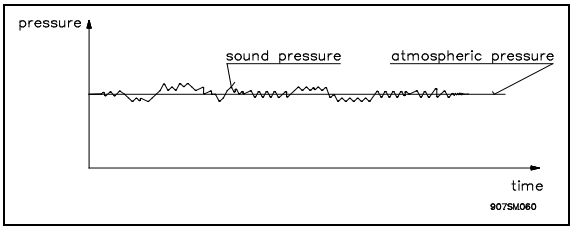


Figure 8: Sound pressure change

Die Grenzwerte des menschlichen Hörbereichs liegen etwa bei 0,00001 Pa und 100 Pa (10 μPa und 100 Pa), erstrecken sich also über 7 Zehnerpotenzen im Druckbereich. Die Hörempfindung wächst nicht mit dem Schalldruck, sondern mit der Schallintensität, die wiederum dem Quadrat des Schalldrucks proportional ist. Wollte man also eine dem menschlichen Ohr angepasste Beschreibung von Schallereignissen mit Hilfe der am leichtesten zugänglichen Messgröße vornehmen, so führte dies zu einer Skala, die 14 Zehnerpotenzen umfasst, ein für die Praxis reichlich unhandliches Vorgehen. Eine einfache, auch in vielen anderen Technikbereichen gebräuchliche Maßnahme lässt diesen weiten Zahlenbereich ganz außerordentlich schrumpfen: man teilt den gerade interessierenden Wert (p^2) durch eine Bezugsgröße am unteren Skalenende (p_0^2) und bildet von diesem Verhältnis den Zehnerlogarithmus.

Solcherart logarithmierte Energieverhältnisse werden mit der Benennung Bel (nach Alexander Graham Bell, dem Erfinder des elektromagnetischen Telefons) versehen. Die somit erzielte Komprimierung des Bereichs von 14 Zehnerpotenzen auf eine Skala von 0 bis 14 Bel bedeutete für die praktische Anwendung eine zu grobe Unterteilung. Man hat deshalb als Beschreibungsgröße den zehnten Teil der Einheit Bel, das <u>Dezibel</u> (dB) gewählt und bezeichnet die durch das beschriebene Verfahren erhaltenen logarithmierten Energieverhältnisse als <u>Pegel</u> L.

The limit values of the human hearing range are at about 0,00001 Pa and 100 Pa (10 μPa and 100 Pa), thus extending over 7 times the tenth power in the pressure range. The sensation of hearing does not increase with the sound pressure, but with the sound intensity, which in its turn is proportionate to the second power of the sound pressure. If one decided to describe a sound occurrence in a way adjusted to the human ear with the help of the most readily available measuring value, this would lead to a scale embracing 14 times the tenth power, a very ungainly procedure for practical purposes. A different procedure, which is also used in other engineering areas, decreases this vast area of figures quite considerably: one divides the value just sought (p^2) through the reference value at the lower end of the scale (p_0^2) and finds the tenth logarithm of this reference value.

Such logarithmic energy relations are identified with the letters Bel (after Alexander Graham Bell, the inventor of the electromagnetic telephone). The compression of the range thus achieved from 14 tenth powers to a scale between 0 and 14 Bel, however, means for practical application too rough a scale. Therefore, the tenth part of the unit Bel, the <u>decibel</u> (dB), has been chosen as characterising value and the logarithmic energy relations obtained through the procedure described are called <u>level</u> L.

Zur Beschreibung von Schallfeldern in Gasen oder Flüssigkeiten werden in erster Linie vier Schallfeldgrößen verwendet:

- Schalldruck
- Schallschnelle
- Schallintensität
- Schallleistung

A2-3.4.1 Schalldruck

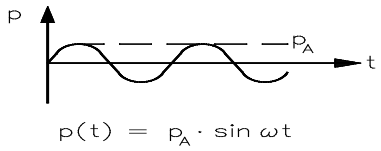
Die charakteristische Größe für die Schallwahrnehmung durch das Gehör ist der Schalldruck. Er nimmt deshalb bei der Beschreibung von Geräuschen eine dominierende Stellung ein. Der Schalldruck (Wechseldruck) ist eine zeitabhängige Größe p(t), deren Zeitfunktion in Bild 8 und Bild 9 (vereinfacht für einen Sinuston) dargestellt ist.

To describe a sound area in gases or fluids, predominantly four sound area values are being used:

- sound pressure
- sound-particle velocity
- sound intensity
- sound power

A2-3.4.1 Sound pressure

The characteristic value for the sound perception in the ear is the sound pressure. It has therefore a governing position in the description of noises. The sound pressure (pressure change) is a value dependent upon time p(t), the function of which is demonstrated in Figure 8 and Figure 9 (simplified for one sine tone).



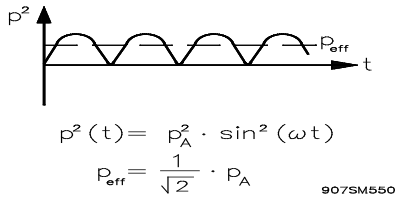


Bild 9: Zeitfunktion eines Sinustons: Schalldruckquadrate, Effektivwert

Figure 9: Time dependence of a sine tone: Sound pressure squares, effective value

Zur Kennzeichnung der Größe des Wechseldrucks wird der Effektivwert p_{eff}, d. h. der quadratische Mittelwert der Zeitfunktion (siehe auch Bild 9)

To characterise the size of the pressure change, the effective value p_{eff}, i. e. the square mean value of the time function is used (see also Figure 9)

$$p_{eff}^2 = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T p^2(t)dt \qquad (2)$$

verwendet, worin T die Integrationszeit des Messgeräts ist. Sie bestimmt die Zeitbewertung des Schallvorgangs (siehe Kapitel A2-4.1). Je nach Zeitstruktur des Schalldrucks und gewählter Zeitbewertung ist der Effektivwert zeitabhängig (schwankende Messwertanzeige). Der Effektivwert einer sinusförmigen Schwingung ist

where T is the integration time of the measuring instrument. It determines the time assessment of the sound effect (see chapter A2-4.1). Dependent upon the time structure of the sound pressure and the time assessment chosen, the effective value is time-dependent (oscillating gauge readings). The effective value of the sinusoidal vibration is

$$p_{eff} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot p_A = 0{,}7 \cdot p_A \qquad (3)$$

In der Praxis lässt man den Index „eff“ häufig entfallen und bezeichnet den Schalldruck mit „p“, meist aber – wenn nicht anders angegeben (z. B. Spitzenwert) – den Effektivwert.

In practice, the index “eff” is frequently dropped and the sound pressure is called “p”, nevertheless – unless clearly stated otherwise (e. g. maximum value) – the effective value is meant.

Der Schalldruckpegel mit der **Bezugsgröße** $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Pa = Hörschwelle (0 dB) ist definiert als

The sound pressure level with the **reference value** $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Pa = limit of audibility (0 dB) is defined as

$$L_p = 10 \cdot \log \frac{p^2}{p_0^2} \text{ dB} = 20 \cdot \log \frac{p}{p_0} \text{ dB} \qquad (4)$$

Der Schalldruckpegel, gemessen in der Umgebung einer Maschine, ist keine maschinenspezifische Größe; er ist vielmehr abhängig vom Messabstand, bei Maschinen mit ausgeprägter Richtcharakteristik auch vom Messort in Bezug auf die Maschine, darüber hinaus von der Raumgröße und der Raumbeschaffenheit (Reflektionsverhalten von Wänden) (siehe Kapitel A2-3.4.4).

The sound pressure level, measured in the vicinity of a machine, is not a value specific to the machine; on the contrary, it is dependent upon the measuring distance, with machines with a distinct direction characteristic also upon the place of measurement related to the machine, additionally upon the size of the room and its nature (reflection behaviour of the walls) see chapter A2-3.4.4).

A2-3.4.2 Schallschnelle

Eine weitere Schallfeldgröße, die Schallschnelle v, beschreibt die Bewegungsgeschwindigkeit der Luftteilchen. Da die Luftteilchen um die Ruhelage schwingen, ist die Schnallschnelle wie der Schalldruck eine Wechselgröße und damit ist ihr Effektivwert die wichtigste Größe (siehe auch Kapitel A2-3.4.1). Sie wird als Schallschnelle bezeichnet, damit es keine Verwechslungen mit der Schallgeschwindigkeit c gibt, welche die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle beschreibt.

A2-3.4.2 Sound-particle velocity

Another value of sound areas, the sound-particle velocity v, describes the speed of movement of air particles. Since the air particles oscillate around their static position, the sound-particle velocity is a changing value as is the sound pr,essure and therefore its effective value is the important information (see also chapter A2-3.4.1). It is called sound-particle velocity to avoid confusion with the speed of sound c, which describes the propagation speed of a wave.

Der Schallschnellepegel mit der **Bezugsgröße** $v_0 = 5 \cdot 10^{-8}\ m/s$ ist definiert als

The level of sound-particle velocity with the reference value $v_0 = 5 \cdot 10^{-8}\ m/s$ is described as

$$L_v = 20 \cdot \log \frac{v}{v_0}\ dB \qquad (5)$$

Schallschnelle und Schnallschnellepegel spielen vor allem in der Körperschallmesstechnik eine große Rolle.

Sound-particle velocity and level of sound-particle velocity play an important role in the measuring technique of structure-borne sound.

A2-3.4.3 Schallintensität

A2-3.4.3 Sound intensity

Schallintensität I – oft als Schallstärke bezeichnet – ist die Schallenergie, die je Sekunde durch eine Flächeneinheit senkrecht zur Ausbreitungsrichtung von Schallwellen hindurch tritt. Sie wird hauptsächlich in einem freien Feld immer in W/m^2 gemessen und als Schallintensitätspegel in dB angegeben.

Sound intensity I – frequently called sound force – is a sound energy that penetrates per second through an area unit vertical to the propagation direction of the sound waves. It is predominantly in a free sound field always measured in W/m^2 and given as sound intensity level in dB.

$$I = p^2 / \rho \cdot c = w \cdot c \qquad (6)$$

wobei p der Schalldruck in N/m^2 ist, $\rho \cdot c$ ist der Wellenwiderstand = $410 \cdot N \cdot s/m^3$ bei Normalbedingungen in Luft, w ist die Schallenergiedichte in $W \cdot s/m^3$ (Schallenergie) und c die Schallgeschwindigkeit in m/s.

where p is the sound pressure in N/m^2, $\rho \cdot c$ is the wave resistance = $410 \cdot N \cdot s/m^3$ at normal conditions in air, w is the density of sound energy in $W \cdot s/m^3$ (sound energy) and c the speed of sound in m/s.

Die o. g. Beziehung gilt jedoch nicht allgemein, insbesondere nicht im Nahfeld einer oder beim gleichzeitigen Einwirken mehrerer Schallquellen. Die genaue Definition der Schallintensität ist

The a. m. relation does not generally apply, especially not in the close vicinity of a sound source or under the simultaneous effect of several sound sources. The exact definition of sound intensity is

$$I = p_{eff} \cdot v_{eff} \qquad (7)$$

mit v als Schallschnelle in Richtung der Schallausbreitung. Messungen der Schallintensität nach dieser Beziehung erfordern einen hohen Geräteaufwand, da die beiden Feldgrößen in 2-Kanal FFT-Analysatoren oder Echtzeit-Digital-Analysatoren verarbeitet werden müssen. Es gibt solche Geräte erst seit wenigen Jahren serienmäßig. Sie werden meist zur Bestimmung der Schallleistung von Maschinen verwendet, wobei zwei Mikrofone in 10 bis 50 mm Abstand zur Bestimmung des der Schallschnelle proportionalen Druckgradienten verwendet werden.

where v is the sound-particle velocity in the direction of sound propagation. Measurements of the sound intensity according to this relation require very sophisticated instruments, since the two area values must be processed in 2-canal-FFT analysers or real-time digital analysers. Such instruments have been in standardised production only for a few years. They are most frequently used for the determination of the sound power of machines, using two microphones in 10 to 50 mm distance to determine the pressure gradient that is proportionate to the sound-particle velocity.

Schallintensitätspegel
Über die Impedanz (Wellenwiderstand) des Mediums kann die Schallintensität der ebenen Welle aus dem Schalldruck bestimmt werden.

Level of sound intensity
Using the impedance (wave resistance) of the medium, the sound intensity of the flat wave can be calculated out of the sound pressure.

$$I = p_{eff} \cdot v_{eff} = p_{eff} \cdot \frac{p_{eff}}{\rho \cdot c} = \frac{{p_{eff}}^2}{\rho \cdot c} \qquad (8)$$

Der Schallintensitätspegel mit der **Bezugsgröße** $I_0 = 1 \cdot 10^{-12}\ W/m^2$ ist definiert als

The sound intensity level with the **reference value** $I_0 = 1 \cdot 10^{-12}\ W/m^2$ is defined as

$$L_I = 10 \cdot \log \frac{I}{I_0}\ dB \qquad (9)$$

A2-3.4.4 Schallleistung

A2-3.4.4 Sound power

Die Schallleistung W einer Schallquelle ergibt sich aus

The sound power W of a sound source is given by

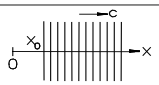
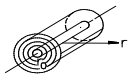
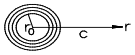
$$W = \int_s I dS \qquad (10)$$

wenn die Schallintensität auf einer Oberfläche S um die Schallquelle, z. B. einer Kugeloberfläche, summiert wird.

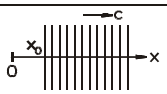
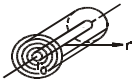
if the sound intensity on a surface S around the sound source, e. g. the surface of a sphere, is added up.

Die geometrische Form einer Schallquelle bestimmt auch die Form dieser Oberfläche (Bild 10). Eindimensionale Schallfelder, die eine konstante Schallintensität haben, gibt es näherungsweise nur im Nahfeld ausgedehnter ebener Schallquellen oder in vergleichsweise kleinen Schallfeldbereichen weit entfernt von lokalisierten Schallquellen. Bei punkt- oder kugelförmigen Schallquellen ist die Schallintensität räumlich nicht konstant (sie sinkt mit dem Viertel des Abstands); bei Verdopplung des Abstands zum Kugelmittelpunkt sinkt die Schallintensität auf ein Viertel (siehe Bild 11).

The geometric form of a sound source decides also the form of the surface (Figure 10). One-dimensional sound areas, possessing a constant sound intensity, can roughly only be found in the vicinity of extensive flat sound sources or in comparatively small sound area ranges far away from localisable sound sources. With point or spherical sound sources, the sound intensity is not constant in the room (it decreases with the square of the distance); by doubling the distance from the centre of the sphere, the sound intensity decreases to a quarter (see Figure 11).

	ebene Schallquelle	linienförmige Schallquelle	punktförmige, kugelförmige Schallquelle
Geometrie			
Schallwechseldruck	$p=\hat{p}_0 \cos\left\{\omega\left(t-\frac{x}{c}\right)\right\}$	$p=p(r_0)\sqrt{\frac{r_0}{r}}\cos\left\{\omega\left(t-\frac{r-r_0}{c}\right)\right\}$	$p=p(r_0)\cdot\frac{r_0}{r}\cos\left\{\omega\left(t-\frac{r-r_0}{c}\right)\right\}$
spezifische Schalleistung	P_A in $\frac{W}{m^2}$	P_l in $\frac{W}{m}$	P in W
Schallintensität	$I = P_A$	$I = \frac{P_l}{2\pi r}$	$I = \frac{P}{4\pi r^2}$
Schallpegeldifferenz	$L_1 - L_2 = 0$	$L_1 - L_2 = 10\lg\frac{r_2}{r_1}$	$L_1 - L_2 = 20\lg\frac{r_2}{r_1}$
Schallpegeldifferenz für $r_2 = 2r_1$	$\Delta L = 0$	$\Delta L = 3dB$	$\Delta L = 6dB$

607SM200

	flat source of sound	linear source of sound	point spherical source of sound
Geometry			
Sound pressure change	$p=p_{A(0)}\cdot\cos\left\{\omega\left(t-\frac{x}{c}\right)\right\}$	$p=p_{A(r_0)}\cdot\sqrt{\frac{r_0}{r}}\cos\left\{\omega\left(t-\frac{r-r_0}{c}\right)\right\}$	$p=p_{A(r_0)}\cdot\frac{r_0}{r}\cos\left\{\omega\left(t-\frac{r-r_0}{c}\right)\right\}$
Specific sound power	W_s in $\frac{Watt}{m^2}$	W_ℓ in $\frac{Watt}{m}$	W in Watt
Sound intensity	$I = W_s$	$I = \frac{W_\ell}{2\pi r}$	$I = \frac{W}{4\pi r^2}$
Difference of sound levels	$L_1 - L_2 = 0$	$L_1 - L_2 = 10\lg\frac{r_2}{r_1}$	$L_1 - L_2 = 20\lg\frac{r_2}{r_1}$
Difference of sound levels for $r_2 = 2r_1$	$\Delta L = 0$	$\Delta L = 3dB$	$\Delta L = 6dB$

907SM090

Bild 10: Wellengleichung in Abhängigkeit der Schallquellengeometrie

Figure 10: Wave equation dependent upon the geometry of the sound source

Schallquelle *Sound source*	Mittlere Leistung *Average power* µW (10^{-6} W)	Maximale Leistung *Maximum power* W	$L_{W\,max}$ dB
Menschliche Stimme, Geige *Human voice, violin*	10	0,001	90
Ventilator, 5000 m^3/h, 500 Pa		0,01	100
Klavier *Piano*	1.000	0,2	113
Posaune *Trombone*	4.000	6	128
Orchester mit 75 Instrumenten *Orchestra with 75 instruments*	4.0000	70	138
Großlautsprecher *Large loudspeaker*		100	140
Düsenflugzeug *Jet aircraft*		10.000	160
Raketentriebwerk *Rocket motor*		10.000.000	190

Tabelle 5: Leistung unterschiedlicher Schallquellen

Table 5: Power of different sound sources

Es ergibt sich ein Schallleistungslegel mit der **Bezugsgröße** $W_0 = 1 \cdot 10^{-12}$ W .

Resulting is a level of sound power with the **reference value** $W_0 = 1 \cdot 10^{-12}$ W .

$$L_W = 10 \lg \frac{W}{W_0} \text{ dB} \qquad (11)$$

Schallleistungspegel finden vorzugsweise ihre Anwendung im technischen Schallschutz, da sie vom Aufstellungsort unabhängige Maschinenkenngrößen sind.

Levels of sound power are preferred for the application in technical sound absorption since they are machine characteristics independent from the location.

Der Schallleistungspegel L_W gibt im logarithmischen Maß die gesamte, von einem Schallstrahler ausgehende Schallleistung W an, bezogen auf $W_0 = 1 \cdot 10^{-12}$ W $= 1$ pW (Picowatt). Achtung: in angelsächsischen Ländern teilweise auf $W_0 = 1 \cdot 10^{-13}$ W , wenn das nicht berücksichtigt wird, macht man einen 10 dB-Fehler.

The level of sound power L_W gives the entire sound power W in a logarithmic value, radiating from a sound emitter related to $W_0 = 1 \cdot 10^{-12}$ W $= 1$ pW (Pico watt). Attention: in Anglo-Saxon countries, the relation is sometimes $W_0 = 1 \cdot 10^{-13}$ W , if this is not noted, 10 dB-mistakes result.

Mit $W_0 = 1 \cdot 10^{-12}$ W stimmen die Zahlenwerte der Schallleistungspegel mit denen des Schallpegels L überein, wenn sich die gesamte Leistung auf eine Fläche von 1 m^2 verteilt.

With $W_0 = 1 \cdot 10^{-12}$ W , the numerical values of the level of sound power are identical with those of the sound level L, if the entire sound power is distributed on a surface of 1 m^2.

Man erhält bei gegebenem L_W den Schallpegel L_d der Entfernung d (m) mit dem Abstandsmaß D_s aus $L_d = L_W - D_s$. Mit $D_s = 10 \lg \frac{S}{S_0}$; mit S_0 = 1 m^2.

The sound level L_d is obtained for a given L_W in the distance d (m) with a distance term $L_d = L_W - D_s$. With $D_s = 10 \lg \frac{S}{S_0}$; with S0 = 1 m^2.

Bei **Kugelwellenausbreitung** mit $S = 4 \cdot \pi \cdot d^2$

For **spherical propagation** with $S = 4 \cdot \pi \cdot d^2$

$$L_d = L_W - 10 \cdot \lg \left(\frac{4 \cdot \pi \cdot d^2}{1\,m^2} \right) = L_W - 11 - 20 \cdot \lg \left(\frac{d}{1\,m} \right) \qquad (12)$$

Schallausbreitung im Halbkugelraum mit $S = 2 \cdot \pi \cdot d^2$

For semi-spherical propagation with $S = 2 \cdot \pi \cdot d^2$

$$L_d = L_W - 10 \cdot \lg \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot d^2}{1\,m^2} \right) = L_W - 8 - 20 \cdot \lg \left(\frac{d}{1\,m} \right) \qquad (13)$$

Im Hallraum ist

In a reverberation room is

$$L_d = L_W + 6 - 10 \cdot \lg \left(\frac{A}{1\,m^2} \right) = L_W + 14 + 10 \cdot \lg \left(\frac{T}{1\,s} \right) - 10 \cdot \lg \left(\frac{V}{1\,m^3} \right) \qquad (14)$$

wobei A die äquivalente Absorptionsfläche in m^2 ist, T ist die Nachhallzeit in s und V das Raumvolumen in m^3.

where A is the equivalent absorption area in m^2, T is the reverberation time in s and V the chamber volume in m^3.

Bei **Linienschallquellen** der Länge ℓ wird meist der linienbezogene Schallleistungspegel je 1 m gleichmäßig strahlender Schallquelle L'_W angegeben. Es ist dann

For **linear sound sources** of a length ℓ. the linear level of sound power is normally given per m evenly radiating sound source L'_W. There is

$$L_W = L'_W + 10 \cdot \lg \left(\frac{\ell}{1\,m} \right) \qquad (15)$$

und der Pegel L'_d je 1 m Länge beim Abstand d

and the level L'_d per m length at a distance d

$$L'_d = L'_W + 10 \cdot \lg \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot d}{1\,m} \right) \qquad (16)$$

Analog hat man bei Flächenschallquellen mit der gleichmäßig Schall abstrahlenden Fläche S den flächenbezogenen Schallleistungspegel L''_W (je 1 m^2) und es ist

Analogue for are sound sources with the evenly sound emitting surface S, one obtains the surface-related level of sound power L''_W (per 1 m^2) and it is

$$L_W = L''_W + 10 \cdot \lg \left(\frac{S}{1\,m^2} \right) \qquad (17)$$

Die durch eine Fläche S hindurch tretende Schallleistung W kann aus der Schallintensität I bestimmt werden (Bild 11):

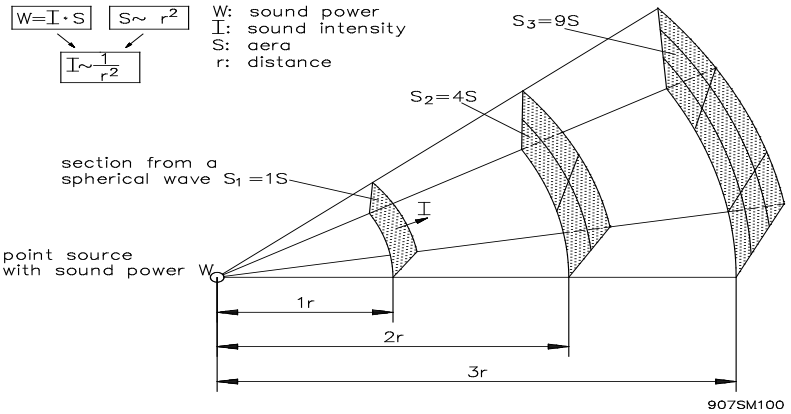
The sound power W penetrating an area S can be determined out of the sound intensity I (Figure 11) as follows:

$$W = I \cdot S \qquad (18)$$

Bei unterschiedlichen Intensitäten auf der Fläche S ergibt sich die Schallleistung durch Summierung über Teilflächen S_i mit konstanter Intensität I_i.

With differing intensities on the area S, the sound power is obtained through summation of the partial areas S_i with constant intensity I_i.

$$W = \sum_i I_i \cdot S_i \qquad (19)$$



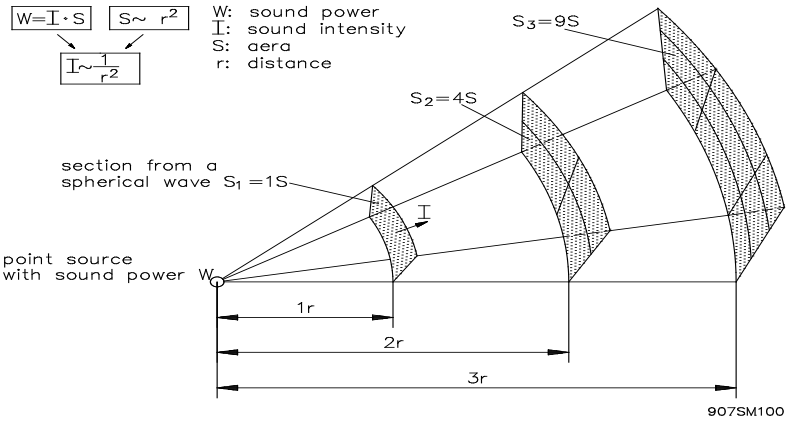


Bild 11: Schallausbreitung in der Umgebung einer Punktquelle

Figure 11: Sound propagation in the vicinity of a point source

A2-3.4.4 Zusammenhang vorgenannter akustischer Kenngrößen und deren Bezugsgröße

A2-3.4.4 Connection between a. m. acoustic characteristic quantities and their reference quantities

Bei einer ebenen Welle ist der Intensitätspegel gleich dem Schalldruckpegel unter normalen atmosphärischen Bedingungen (20 °C, 1 bar).

For a flat wave, the level of intensity is equal to the sound pressure level in the standard atmospheric conditions (20 °C, 1 bar).

$$10 \lg \frac{I}{I_0} = 10 \lg \frac{p_{eff}^2}{p_0^2} \qquad (20)$$

$$L_I = L_p \qquad (21)$$

Mit der Bezugsgröße $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Pa und $\rho \cdot c$ ergibt sich für v_0 (Bezugsgröße der Schnelle):

With the reference quantity $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Pa and $\rho \cdot c$, v_0 (reference quantity of the velocity) is obtained:

$$v_0 = \frac{p_0}{\rho_n \cdot c_0} = \frac{2 \cdot 10^{-5}\ \text{Pa}}{410\ \text{Pa} \cdot \text{s/m}} = 5 \cdot 10^{-8}\ \text{m/s} \qquad (22)$$

Die <u>Intensität</u> der ebenen Welle errechnet sich aus dem Produkt der Effektivwerte von Druck und Schnelle und damit ist I_0 die Bezugsgröße.

The <u>intensity</u> of the flat wave is calculated out of the product of the effective values of pressure and velocity, with the reference quantity I_0.

$$I = p_{eff} \cdot v_{eff} \qquad (23)$$

$$I_0 = p_0 \cdot v_0 = 2 \cdot 10^{-5}\ \text{Pa} \cdot 5 \cdot 10^{-8}\ \text{m/s} = 10^{-12}\ \text{Nm/s} \qquad (24)$$

Die Schallleistung ergibt sich aus dem Produkt von Intensität und Fläche

The sound power is the product of intensity and area

$$W = I \cdot S \qquad (25)$$

und die Bezugsgröße W_0

and the reference quantity W_0

$$W_0 = I_0 \cdot S_0 = 10^{-12}\ \text{N/(ms)} \cdot 1\,\text{m}^2 = 10^{-12}\ \text{Nm/s} \qquad (26)$$

Der Schallleistungspegel errechnet sich aus der Summierung von Intensitätspegel und Flächenpegel.

The level of sound power is calculated as summation of intensity level and area level.

$$\frac{W}{W_0} = \frac{I \cdot S}{W_0} = \frac{I}{I_0} \cdot \frac{S}{S_0} \qquad (27)$$

$$10\ \lg \frac{W}{W_0} = 10\ \lg \frac{I}{I_0} + 10\ \lg \frac{S}{S_0} \qquad (28)$$

$$L_W = L_i + D_S \qquad (29)$$

A2-4 Physiologisch-technische Grundlagen

Um bei der Messung von Geräuschen mit einem einzigen Zahlenwert auszukommen und objektiv vergleichbare Werte zu erhalten, hat man in die Schalldruckmessgeräte Filter und Zeitglieder eingebaut, die die Schalldrücke in den verschiedenen Frequenzbereichen unterschiedlich bewerten. Es wird gewissermaßen die Empfindlichkeit des menschlichen Ohrs simuliert.

A2-4 Physiological, technical basics

To be content with a single nominal value for the measurement of noises and to obtain objectively comparable quantities, sound pressure measuring instruments have been equipped with filters and time discriminators which weigh the sound pressures in the different frequency ranges differently. This is so to speak a simulation of the sensibility of the human ear.

A2-4.1 Zeitbewertung

Schalldruckpegel in der Lärmbekämpfung sind in der Regel zeitlich nicht konstant, sondern ändern sich nach Art des Geräuschs mehr oder weniger rasch (Bild 12).

Man hat deshalb international drei verschiedene Anzeigearten der Schallpegelmessgeräte festgelegt:

A2-4.1 Time weighting

Sound pressure levels in noise suppression are normally not constant over time, but change regarding the character of the noise more or less rapidly (Figure 12).

Therefore, three different scales have been internationally standardised for sound level gauges:

Impulse (I) *Impulses (I)*	Zur allgemeinen Anwendung auch bei kurz dauernden und impulshaltigen Geräuschen, Zeitkonstante t_{auf} = 35 ms; t_{ab} = 1500 ms (d. h. alle Schallereignisse, die etwa das Messgerät innerhalb dieser Zeitspanne registriert, werden summiert und zur Anzeige gebracht). *For general application also with short-time and impulse-heavy noises, time constant t_{up} = 35 ms; t_{down} = 1500 ms (i. e. all sound emissions registered by the gauge in that time span are added and shown).*
Schnell *Fast (F)*	Für Schallvorgänge, die nicht kurz dauernd oder impulshaltig sind, Zeitkonstante etwa t_{auf} = t_{ab} = 125 ms. *For sound emissions that are neither short nor impulse-heavy, time constant roughly t_{up} = t_{down} = 125 ms.*
Langsam *Slow (S)*	Für Schallereignisse mit langsam sich änderndem Pegel sowie für Messungen zur Ermittlung des Schallleistungspegels, Zeitkonstante etwa t_{auf} = t_{ab} = 1000 ms. *For sound emissions with slowly changing level and for measurements to determine the level of sound power, time constant roughly t_{up} = t_{down} = 1000 ms.*

Da der am Schallpegelmesser abgelesene Messwert sowohl von der Frequenzbewertungskurve als auch von der Art der Zeitbewertung abhängt, ist die bei Messungen gewählte Kombination durch entsprechende Kennzeichnung anzugeben. Es sind demnach folgende Messwerte des A-bewerteten Schalldruckpegels möglich: L_{AI}, L_{AF}, L_{AS}, für Impulse, fast (schnell)- und slow (langsam)-Stufen. Entsprechende Kombinationen gibt es natürlich mit den B-, C- und D-bewerteten Bewertungskurven.

Since the measured value read on the sound level gauge is dependent upon both the frequency weighting curve and the mode of time weighting, the chosen combination for each measurement must be declared through an appropriate marking. Obviously, the following measuring values for the A-weighted sound pressure level are possible: L_{AI}, L_{AF}, L_{AS}, for impulse fast and slow levels. Similar combinations are of course possible for the B-, C- and D-weighting curves.

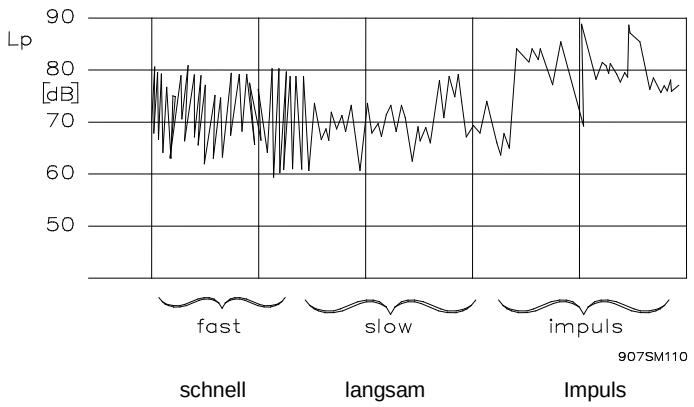


Bild 12: Registrierschrieb einer Sprechprobe

Figure 12: Registration reading of a talking test

Messungen in „fast"- und „slow"-Stellung ergeben gleiche Werte:

Measurements in the "fast" and "slow" position result in the same values:

$$L_{Fm} = L_{Sm} = L_{eq} \qquad (30)$$

Sie werden auch als energieäquivalente Dauerschallpegel L_{eq} bezeichnet, da sie ein Maß für die Schallenergie am Messpunkt sind.

They are also called energy-equivalent permanent sound levels L_{eq}, since they are a reference for the sound energy and the measuring point.

Im Bereich der deutschen Normung wird als weitere Zeitbewertung das so genannte Taktmaximalpegel-Verfahren verwendet (Pegelbezeichnung L_{FT}). Bei diesem Verfahren wird das Schallsignal in gleich lange Zeitintervalle (Takte) eingeteilt. In jedem Takt ist der Taktmaximalpegel $L_{FT}(t)$ gleich dem Maximalwert des Schalldruckpegels $L_F(t)$. Nach DIN 45645-1 soll die Taktzeit zwischen 3 s und 5 s betragen. Im Immissionsschutz ist eine Taktzeit von 5 s üblich.

In German standardisation, the so-called clock-impulse maximum level procedure is used (level declaration L_{FT}) as an additional time assessment. In this procedure, the sound signal is divided into time intervals of equal length (clock-impulses). In each clock-impulse, the clock-impulse maximum level $L_{FT}(t)$ is equal to the maximum value of the sound pressure level $L_F(t)$. According to DIN 45645-1, the clock-impulse time should be between 3 s and 5 s. In sound protection, the clock-impulse of 5 s is common.

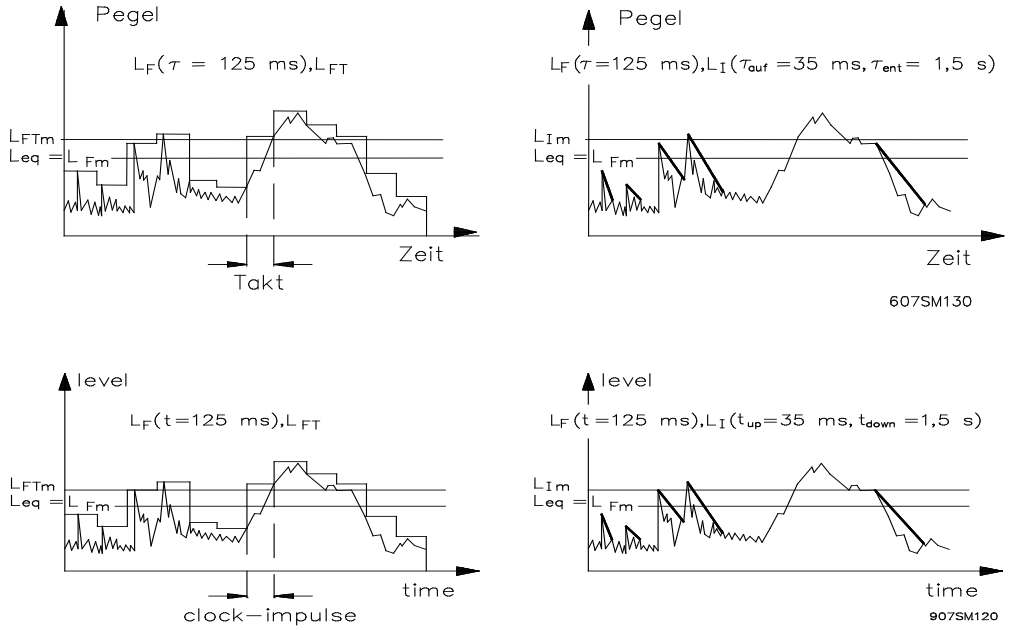


Bild 13: Gegenüberstellung verschiedener Messverfahren für ein und dasselbe Schallsignal

Figure 13: Comparison of different measurement methods for one and the same sound signal

Durch Schallmessung in Stellung „impulse" oder „Takt maximal" erfolgt eine zusätzliche Gewichtung, die impulshaltige Geräusche stärker bewertet.

By sound measuring in the position "impulse" or "clock-impulse maximum", an additional weighting is obtained which gives a higher assessment to noises with heavy impulses.

A2-4.2 Frequenzbewertung

Die Beurteilung von Lärm hinsichtlich seiner Störfähigkeit lässt sich aus der Angabe eines Schallpegels allein nicht durchführen. Wir müssen wissen, bei welcher Frequenz die Schwerpunkte des Geräuschs liegen, wir müssen seine frequenzmäßige Zusammensetzung bzw. seine spektrale Verteilung hinreichend genau kennen.

Die Frequenzabhängigkeit der menschlichen Hörempfindung (Bild 14) glättet sich zusehends mit zunehmendem Lautstärkepegel, um bei der Schmerzschwelle nur noch eine Spanne von etwa 35 dB zu betragen.

Die Kurven sind in zahlreichen Versuchen festgelegt worden, wobei für den Lautstärkepegel folgende Definition gilt: Ein Geräusch hat den Lautstärkepegel n phon, wenn es von normal hörenden Beobachtern als gleich laut beurteilt wird wie ein reiner Ton der Frequenz 1000 Hz, der als ebene, fortschreitende Schallwelle genau von vorn auf den Beobachter trifft und dessen Schalldruckpegel n dB beträgt.

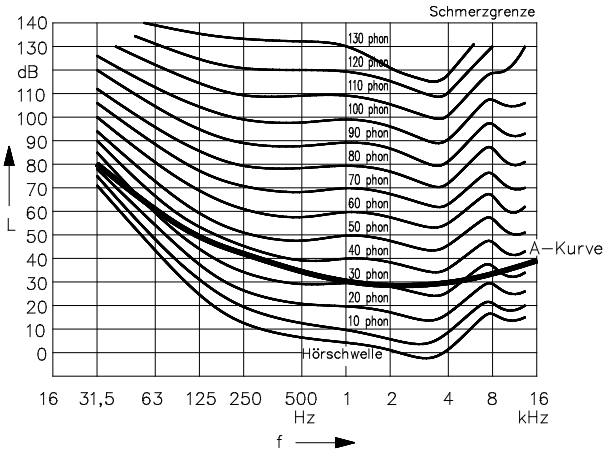


Bild 14: Kurven gleicher Lautstärkepegel für Sinustöne

Eine solchermaßen durchgeführte Beurteilung eines Geräuschs ist natürlich sehr aufwändig und für die Praxis völlig ungeeignet. Auch existierende Rechenverfahren, z. B. nach Stephens oder Zwicker, die auf den Hörversuch verzichten können, sind für den täglichen Bedarf der Lärmbekämpfung zu aufwändig. Deshalb wurden zur frequenzmäßigen Bewertung von Schallereignissen vier Bewertungskurven festgelegt. Die heute am meisten benutzte Kurve zur frequenzmäßigen Bewertung von Schallereignissen ist die international vereinbarte **Bewertungskurve A** (Bild 15). Pegel, die mit dieser Kurve bewertet wurden, erhalten die Einheit dB(A).

Daneben spricht man von der Frequenzbewertung „Lin“ (linear), wenn das Übertragungsmaß der Schallpegelmessgeräte frequenzabhängig ist.

Ursprünglich sollte diese Kurve nur für Geräusche mit niedrigen Pegelwerten (bis ca. 30 dB(A)) angewandt werden, da sie in etwa die Frequenzabhängigkeit des menschlichen Gehörs im unteren Pegelbereich nachbildet; die Bewertungskurve A besitzt etwa die Form der Kurven gleicher Lautstärkepegel in diesem Pegelbereich, wenn man diese Kurven nach unten umklappt. Bei höheren Pegelwerten sollten die Kurven B und C herangezogen werden. Die lange währenden Bestrebungen nach Vereinfachung der Bewertung durch Beschränkung auf eine einzige Kurve kam entgegen, dass die Bewertungskurve A außer dem Hörempfinden im niedrigen Pegelbereich auch den Frequenzverlauf der Lärmschwerhörigkeit und der Störfähigkeit von Geräuschen hervorragend beschreibt. Deshalb wird heute in der Lärmbekämpfung – von wenigen Ausnahmen abgesehen – ausschließlich die A-Kurve zur frequenzmäßigen Bewertung von Schallereignissen herangezogen.

A2-4.2 Frequency weighting

An assessment of noise regarding the resulting irritation is not possible by only using an information on the sound level. We must know at which frequency are the main parts of the noise, we must also know the composition of frequencies, respectively its spectral distribution with sufficient accuracy.

The frequency dependence of the human hearing (Figure 14) is levelled out with increasing noise levels, at the threshold of pain, the span is only about 35 dB.

The curves have been established in numerous tests where the loudness level is defined as follows: A noise has the loudness level n phon, if it is perceived by an observer of normal hearing as equal in loudness to a pure tone of the frequency 1000 Hz, which hits the observer as flat continuous sound wave right from the front, having a sound pressure level of n dB.

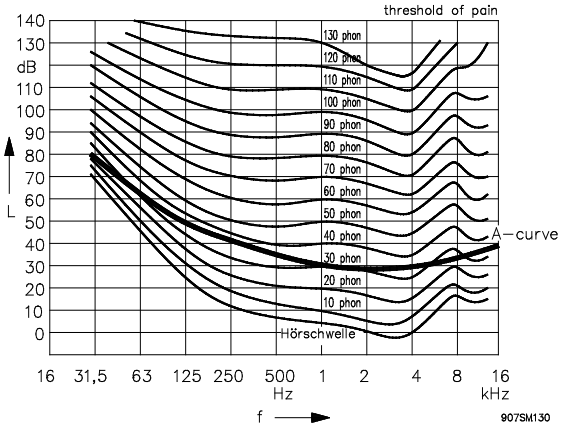


Figure 14: Curves of equal sound pressure level for sine tones

The weighting of a noise executed in this way is of course very expensive and unfit for practical applications. Existing calculation methods, e. g. according to Stephens or Zwicker, which can do without a hearing test, are too expensive for the daily need of noise suppression. For the frequency-related weighting of sound effects, therefore, four assessment curves have been established. The curve for the frequency-related weighting of sound effects most frequently used today is the internationally established **weighting curve A** (Figure 15). Levels that have been weighted using this curve are declared in the unit dB(A).

Additionally, one speaks of the frequency weighting “Lin” (linear) where the transmission measurement of the sound level gauges is independent of frequency.

Originally, this curve was meant only to be applied to noises with low level values (up to 30 dB(A)), since it pictures by and large the frequency dependence of the human ear in the lower level spectrum; the weighting curve A has roughly the form of curves of similar noise levels in this range if the curve is wheeled around downwards. For higher level values, the curves B and C should be used. The long-standing attempts to simplify the weighting through the limitation to a single curve were supported by the fact that the weighting curve A not only gives a pretty good description of the hearing sensation in the low level range, but also of the frequency course of noise-induced hearing loss and of the irritation potential of noises. It is therefore that today in noise suppression – with very few exceptions – only the A-curve is used for the frequency-related weighting of sound effects.

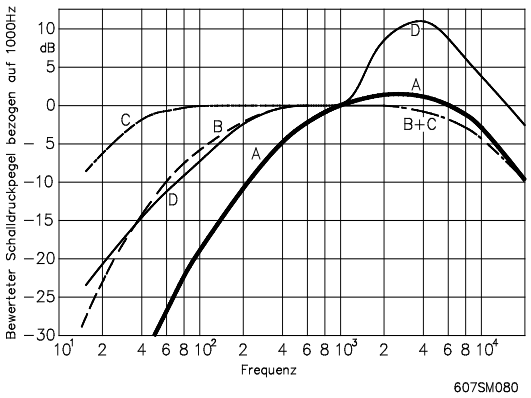


Bild 15: Bewertungskurven A, B, C und D: Bewertete Schalldruckpegel bezogen auf den Wert bei 1000 Hz in Abhängigkeit von der Frequenz

Die **Bewertungskurve B** wurde früher für die frequenzmäßige Beurteilung von Geräuschen im mittleren Schalldruckpegelbereich (ca. 30 – 60 dB(B)) herangezogen, da sie in etwa den Verlauf der umgeklappten Hörkurve in diesem Gebiet nachbildet. Sie hat heute nur noch historische Bedeutung. Die B-Bewertung wird gelegentlich ergänzend bei der Messung von Kraftfahrzeug-Innengeräuschen eingesetzt.

Die **Bewertungskurve C** wurde ursprünglich zur Beurteilung von Geräuschen mit einem hohen Schalldruckpegel herangezogen, wo die Hörkurve annähernd horizontal verläuft. Sie wird heute nur noch selten in der Lärmbekämpfung angewendet, z. B. bei der Beurteilung tieffrequenter Geräuschimmissionen.

Die **Bewertungskurve D** wird bei Messungen von Fluglärm benutzt, allerdings nicht in Deutschland. Die Messung des bewerteten Schallpegels kann ohne Verwendung eines Oktav- oder Terzfilters zur ersten Orientierung darüber dienen, ob das zu beurteilende Geräusch bevorzugt Anteile im hohen oder im tiefen Frequenzbereich aufweist. Ist der B-Schallpegel wesentlich größer als der A-Schallpegel, wird es sich um ein Geräusch handeln, dessen Hauptanteil im Frequenzbereich unterhalb 500 Hz liegt. Sind A- und B-Schallpegel etwa gleich, wird der Hauptanteil bei 1000 Hz und höher liegen. Ein vergleichsweise hoher D-Schallpegel stellt sich bei Geräuschen im Bereich zwischen 2000 Hz und 8000 Hz ein.

Tabelle 6 zeigt die Unterschiede zwischen A-bewerteten und unbewerteten Pegeln bei einem Gasmotor.

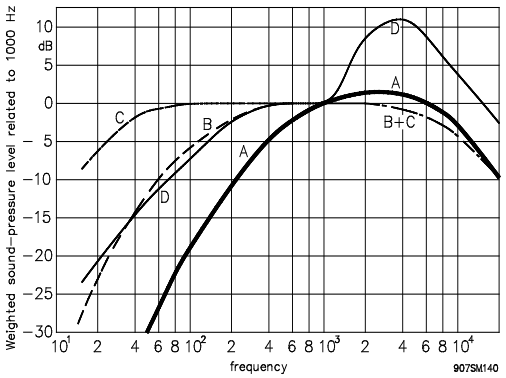


Figure 15: Weighting curves A, B, C and D: Sound pressure levels weighted related to the value at 1000 Hz in dependence upon the frequency

The **weighting curve B** used to be taken into consideration for the frequency-related weighting of noises in the medium range of sound pressure levels (about 30 – 60 dB(B)), since it mirrors roughly the course of a rotated hearing curve in this area. Today it is only of historical importance. The B-weighting is occasionally used as an additional gauge whilst measuring the internal noises in vehicles.

The **weighting curve C** used to be taken into consideration for the weighting of noises with a very high sound pressure level, where the hearing curve is almost horizontal. Today it is used in sound protection only and for the weighting of very low frequency sound emissions.

The weighting curve D is used for the measurement of aviation noise, however, not in Germany. The measurement of the sound level weighted may without the use of an octave or third-octave filter serve a first orientation regarding the question whether the machine weighted emits predominantly noises in the high or the low frequency range. If the B sound level is considerably higher than the A sound level, the main share of the noise weighted will be in the frequency area below 500 Hz. If A and B sound levels are roughly equal, the main share will be at 1000 Hz and above. A comparatively high D sound level occurs with noises in the area between 2000 Hz and 8000 Hz.

Table 6 shows the difference between A-weighted and not weighted levels with a gas engine.

Oktavband-Mittelfrequenz ***Octave band centre frequency***	**31,5**	**63**	**125**	**250**	**500**	**1000**	**2000**	**4000**	**8000**	**Summe** ***Sum***
gemessener Schalldruckpegel *Sound pressure level measured* [dB]	91	92	93	94	95	96	92	88	83	102,3
A-Bewertung *A-weighting*	-39,4	-26,2	-16,1	-8,6	-3,2	0	+1,2	+1,0	-1,1	
bewerteter Schalldruckpegel *Sound pressure level weighted* [dB(A)]	51,6	65,8	76,9	85,4	91,8	96,0	93,2	89,0	81,9	99,5

Tabelle 6: Berechnung des A-Schalldruckpegels aus einem Oktavbandspektrum, z. B. Gasmotor, 300 kW, 1500 · 1/min, 1 m vom Abgasrohr

Table 6: Calculation of the A sound pressure level out of a octave band spectrum, e. g. gas engine, 300 kW, 1500 · 1/min, 1 m from exhaust pipe

A2-4.3 Grenzkurven

In Europa wird vielfach die Bewertung von Störgeräuschen mit Hilfe der so genannten NR-Kurven (noise rating curves) vorgenommen (Bild 16).

A2-4.3 Rating curves

In Europe, the weighting of irritating noises is frequently done with the aid of so-called NR curves (noise rating curves) (Figure 16).

Die Oktavpegel werden in das Grenzkurven-Diagramm eingetragen. Der NR-Wert der Kurven entspricht ihrem dB-Wert bei 1000 Hz. Das Geräusch wird durch den NR-Wert der niedrigsten Kurve, die von dem zu beurteilenden Spektrum noch nicht überschritten wird, gekennzeichnet, wobei ggf. zwischen den dargestellten Kurven zu interpolieren ist.

Nach diesem Verfahren werden also auch sehr komplexe Schallereignisse nur nach einer Oktave beurteilt, und höchst unterschiedliche Spektren erhalten die gleiche Kennzahl, wenn sie nur die gleiche Kurve berühren, wobei dieses Berühren sich auf einen Punkt, einen Bereich oder auf die ganze Kurve erstrecken kann.

Das Grenzkurvenverfahren liefert also gegenüber dem A-bewerteten Schalldruckpegel nicht mehr Information, es besagt nichts über den tatsächlichen Verlauf des Spektrums.

The octave levels are inserted into the rating curves' diagram. The NR value of the curves equals their dB value at 1000 Hz. The noise is characterised by the NR value of the lowest curve that is not yet exceeded by the spectrum to be weighted. Possibly, an interpolation between the curves represented is needed.

With this procedure, also very complex sound effects are gauged only after one octave, and very different spectra receive the same declared figure as long as they touch the same curve, where this contact with the curve can be a point, an area or the entire course of the curve.

This rating curve procedure, therefore, does not render any additional information compared to the A-weighted sound pressure level and does not say anything about the actual course of the spectrum.

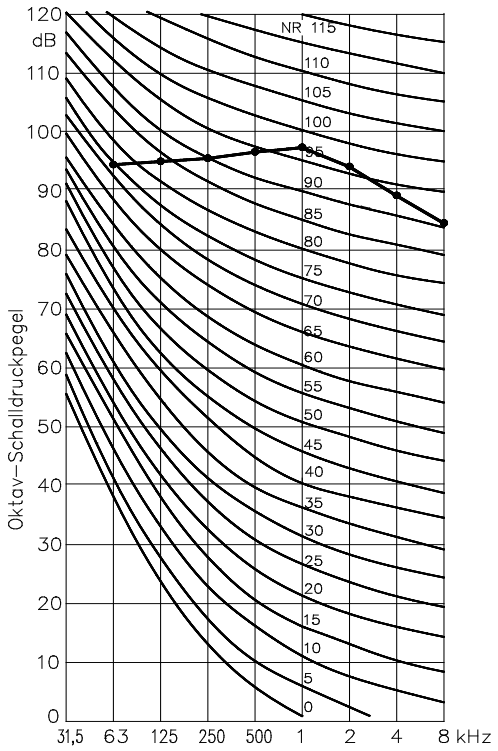


Bild 16: Noise-rating-Kurven: eingezeichnet wurde ein Ventilatorspektrum mit einem Wert von NR 96

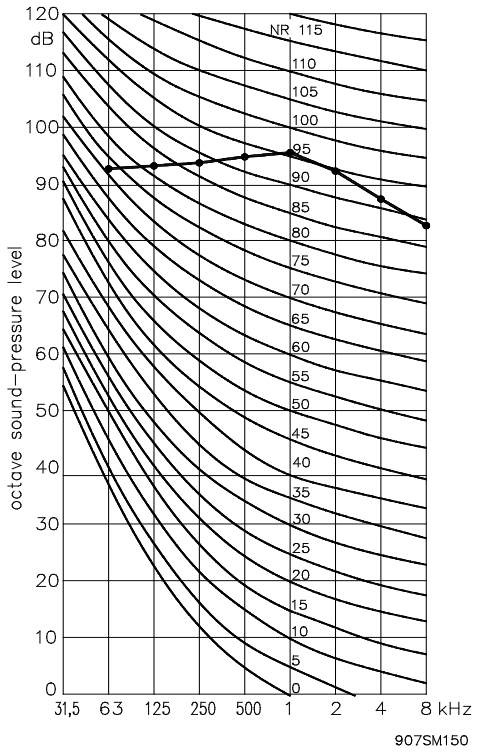


Figure 16: Noise rating curves: a ventilator spectrum with a value NR 96 has been inserted

A2-4.4 Lautstärke

Wie schon gezeigt, ist die Empfindlichkeit des menschlichen Ohrs frequenzabhängig. Bei gleichem Schallpegel werden tieffrequente Töne leiser wahrgenommen als mittelfrequente um 1000 Hz (Bild 14).

Der Maßstab für das Lautheitsempfinden des Gehörgangs ist die Lautstärke L_N. Er ist so gewählt, dass bei einer Frequenz von 1000 Hz der Wert der Lautstärke gleich dem Schalldruckpegel ist. Die Lautstärke wird in der Maßeinheit phon gemessen.

Mit Hilfe von Bild 14 kann aus dem Schalldruckpegel bei einer beliebigen Oktavmittenfrequenz die Lautstärke bestimmt werden. Das menschliche Gehör nimmt Lautstärkeunterschiede von ΔL_S = 1 phon gerade noch wahr. Bei L_S = 120 phon liegt die Schmerzgrenze des Gehörs.

A2-4.4 Loudness level

As already demonstrated, the sensibility of the human ear is frequency-dependent. With equal sound levels, lower frequency tones are perceived as fainter than medium-frequency tones around 1000 Hz (Figure 14).

The scale for the volume perception of the auditory organs is the loudness level L_N. It has been so determined that at a frequency of 1000 Hz the value of the loudness level is equal to the sound pressure level. The loudness level is measured in the unit phon.

Using Figure 14, the sound pressure level at any arbitrary chosen octave medium frequency can be used to determine the loudness level. The human ear just discerns loudness level differences of ΔL_S = 1 phon. At L_S = 120 phon is the pain threshold of the ear.

Die Hörschwelle entspricht nicht dem Lautstärkepegel von L_N = 0 phon, sondern dem von L_N = 4 phon. Der Grund dafür ist, dass international als Bezugsschalldruck der runde Wert $p_{eff0} = 2 \cdot 10^{-5}$ Pa (20 µPa) vereinbart ist, die tatsächliche Hörschwelle aber bei einem etwas höheren Schalldruck liegt.

The hearing threshold is not at the loudness level of L_N = 0 phon, but at L_N = 4 phon. The reason for this is that an international reference sound pressure has been agreed as the round value $p_{eff0} = 2 \cdot 10^{-5}$ Pa (20 µPa), whilst the actual hearing threshold lies at a higher sound pressure.

Eine Erhöhung des Schallpegels um 10 dB entspricht einer Verdoppelung des Lautstärkeeindrucks. Dementsprechend wird eine Verminderung um 10 dB als Halbierung des Lautstärkeeindrucks empfunden.

An increase of the sound level by 10 dB equals a duplication of the loudness level impression. Equally, a decrease by 10 dB is perceived as a halving of the loudness level impression.

Ein proportional zur Schallempfindung steigendes Maß ist die Lautheit.

A dimension increasing proportionally to the sound impression is the sonority.

$$S = 2^{0,1 \cdot (LN-40)} \text{ sone} \qquad (31)$$

Die Zahlenwerte der Lautheit S werden durch den Zusatz sone gekennzeichnet. Nach o. g. Gleichung entspricht die Lautstärke L_N = 40 phon der Lautheit S = 1 sone.

The numerical values of sonority S are marked with the addition sone. According to the a. m. equation, the loudness level L_N = 40 phon equals a sonority S = 1 sone.

A2-4.5 Lärmschwerhörigkeit

A2-4.5 Noise-induced hearing loss

Anhaltende Belastung durch Lärm verursacht eine Beschädigung der Haarzellen (siehe A2-2.1) und führt dazu, dass die Hörfähigkeit allmählich abnimmt. Zunächst ist die Beschädigung weniger Haarzellen nicht wahrnehmbar, werden jedoch immer mehr beschädigt, kann das Gehirn diesen Informationsverlust nicht mehr ausgleichen. Worte vermischen sich, Sprache und Hintergrundgeräusche können nicht mehr unterschieden werden und Musik wird gedämpft wahrgenommen. Beträchtliche und irreparable Schädigungen sind bereits aufgetreten, wenn der Hörer sich des Verlusts bewusst wird. Hörverlust durch Lärmbelastung ist meist in den Frequenzen am größten, in denen das Ohr am empfindlichsten ist (bei 4000 Hz).

Continued exposure to noise causes a damage of the hair cells (see A2-2.1) and leads to slowly decreasing hearing sensibility. Originally, the damage of a few hair cells is imperceptible. However, as ever more of them are damaged, the brain cannot equalise this loss of information. Words are mixed, speech and background noises cannot be discerned anymore and music is perceived only attenuated. Considerable and irreparable damages have already occurred when the person in question realises that loss. Hearing loss through noise exposure is most frequently most distinct in frequency areas where the human ear is most susceptible (at 4000 Hz).

Hohe Schalldruckamplituden führen nur in Extremfällen, z. B. bei Stoßwellen von Explosionen, zur Schädigung des Trommelfells; sie führen in der Regel zu einer sofortigen Vertaubung, bei der durch Stoffwechselstörungen die Haarzellenempfindlichkeit vermindert wird. Diese Anhebung der Hörschwelle bildet sich wieder vollkommen zurück, wenn die hohe Schallexposition durch Erholungspausen unterbrochen wird und nur kurzfristig ist. Jahrelange Schallbelastung verursacht eine beschleunigte Degeneration der Haarzellen und einen irreparablen Hörverlust, die Lärmschwerhörigkeit.

High amplitudes of sound pressure lead to damage of the air drum only in extreme cases, e. g. through explosion shock waves. These normally lead to immediate deafness since the susceptibility of the hair cells is diminished through metabolic disturbance. This increase of the hearing threshold is completely reversed if the high noise exposure is interrupted through recreation phases and if it is only short. Noise exposure, continued over years, causes an increased degeneration of the hair cells and an irreversible loss of hearing, the so-called noise-induced hearing loss.

Mit zunehmendem Lebensalter tritt die langsame Zerstörung der Hörzellen ein. Ursachen hierfür sind z. B. Durchblutungsstörungen und lang andauernde Einwirkung von Lärmbelastung. Die Frequenzabhängigkeit und der Absolutwert der Hörschwelle verändern sich: es stellt sich die Altersschwerhörigkeit ein.

With increasing age, a slow destruction of the hair cells occurs. It can be caused e. g. by circulation disturbances and very long continued effects of noise exposure. The dependence upon frequency and the absolute value of the hearing threshold change: the old-age hearing loss emerges.

Der äquivalente Dauerschallpegel (Mittelungspegel) ist ein Maß für die Schallbelastung des Gehörs. Er wird durch Summierung der A-bewerteten Schallpegel $L_{A,i}$ in den n Zeitintervallen t_i des Bezugszeitraums t_B, z. B. t_B = 8 h, gebildet.

The equivalent permanent sound level (average level) is a measurement for the sound exposure of the ear. It is obtained through a summation of the A-weighted sound levels $L_{A,i}$ in the n time intervals t_i of the reference period t_B, e. g. t_B = 8 h.

$$L_{Aeq} = 10 \cdot \log \left\{ \frac{1}{t_B} \cdot \sum_{t=1}^{n} \left(t_i \cdot 10^{0,1 \cdot L_{A,i}} \right) \right\} \text{ dB(A)} \qquad (32)$$

Nach der EG-Richtlinie 86/188/EWG „Schutz der Arbeitnehmer gegen Gefährdung durch Lärm am Arbeitsplatz“ liegt der Grenzwert der Gehörbelastbarkeit bei einem äquivalenten Dauerschallpegel von L_{eq} = 85 dB(A), bezogen auf einen achtstündigen Arbeitstag; er führt bei 5 % der Betroffenen nach zehn Jahren zu einer Lärmschwerhörigkeit.

According to EU directive 86/188/EEC “Protection of workers against danger cause by noise at the workplace”, the limit value of noise exposure of the ear is at equivalent continuous sound level of L_{eq} = 85 dB(A), related to an eight-hours working day. It leads to noise-induced hearing loss with 5% of the exposed people after ten years.

Wird der auf einen achtstündigen Arbeitstag bezogene äquivalente Dauerschallpegel von L_{eq} = 90 dB(A) überschritten, dann sind Gehörschutzmittel (Stöpselgehörschützer, Kapselgehörschützer, Gehörschutzkappen) zu tragen.

If the equivalent continuous sound level of L_{eq} = 90 dB(A), related to an eight-hours working day, is exceeded, then ear-protective equipment has to be worn (stud ear protectors, capsule ear protectors, ear caps).

Die berufsbedingte Schwerhörigkeit beginnt meistens mit einer Anhebung der Hörschwelle im Frequenzbereich von f = 2 kHz bis f = 6 kHz, weil dort viele Lärmquellen das Schallpegelmaximum haben. Die über die Schallempfindung vegetativ gesteuerte Innenohr-Stoffwechseländerung kann auch auf andere Körperfunktionen übergreifen und zu Kreislauf-, Herz- und Gleichgewichtsstörungen führen.

The labour-induced hearing loss starts in most cases with an increase of the hearing threshold in the frequency range of f = 2 kHz up to f = 6 kHz, since many sound sources have their sound level maximum there. The metabolic changes in the inner ear, vegetatively controlled via the sound perception, can also influence other body functions and lead to circulation, heart and balance disturbances.

A2-5 Pegelarithmetik

Zwei gleich starke Schallquellen erzeugen nicht den doppelten Schallpegel! Schallpegel sind logarithmierte Größen, die nicht ohne weiteres zusammengezählt werden dürfen. Sie müssen zuvor delogarithmiert und auf der Grundlage von Intensitäten oder Schalldruckquadraten energieäquivalent addiert werden. Für den Praktiker werden nachstehend die anwendungsfertigen Gleichungen für die Addition, Subtraktion und Mitteilung von Pegeln genannt, ohne dass sie mathematisch abgeleitet werden.

A2-5 Level arithmetics

Two equally strong sound sources do not create a duplication of the sound level! Sound levels are logarithmic values which cannot readily be added. They must be de-logged" first and be added on the basis of the intensity of sound pressure squares. For the practician, the ready-for-use equations below for addition, subtraction and interpolation of levels are given, without explaining them mathematically.

A2-5.1 Addition von Pegeln

Bei der Überlagerung des Schalldruckpegels L_1 der Schallquelle 1 mit dem Schalldruckpegel L_2 der Schallquelle 2 ergibt sich als resultierender Gesamtschalldruckpegel L_{ges}:

A2-5.1 Addition of levels

For the superposition of the sound pressure level L_1 of the sound source 1 with the sound pressure level L_2 of the sound source 2, the resulting overall sound pressure level L_{res} is given:

$$L_{ges} = 10 \cdot \log \left(\sum_{1}^{n} 10^{\frac{L_i}{10}} \right) \qquad (33)$$

Ist z. B. L_1 = 80 dB und L_2 = 85 dB, ergibt sich als Gesamtschalldruckpegel

Where e. g. L_1 = 80 dB and L_2 = 85 dB, the overall sound pressure level is

$$L_{ges} = 10 \cdot \log \left(10^{0,1 \cdot 80} + 10^{0,1 \cdot 85} \right) = 86,2 \text{ dB}$$

Aus der Gleichung lassen sich auch die Ergebnisse für die folgenden Spezialfälle ableiten, mit denen der Messtechniker häufig arbeitet (Beispiel in Klammern):

- Bei zwei gleich großen Pegeln $L_1 = L_2$ (90 dB) ergibt sich ein um 3 dB größerer Gesamtpegel: $L_{ges} = L_1 + 3$ (93 dB).
- Bei zehn gleich großen Pegeln vergrößert sich der Gesamtpegel um 10 dB.
- Ist der Pegel L_1 (90 dB) um mindestens 10 dB größer als der Pegel L_2 (80 dB), fällt der andere Pegel beim Gesamtpegel kaum noch ins Gewicht: $L_{ges} = L_1$ (ca. 90 dB; genau 90,4 dB).
- Tritt der niedrigere Pegel L2 jedoch mehrfach auf, ist eine rechnerische Bestimmung des Gesamtpegels erforderlich.

This equation leads also to results for the following special cases with which measurement technicians work frequently (example in brackets):

- For two similar levels $L_1 = L_2$ (90 dB), an overall level increased by 3 dB results: $L_{res} = L_1 + 3$ (93 dB).
- For ten similar levels, the overall level is increased by 10 dB.
- Is the level L_1 (90 dB) at least 10 dB higher than the level L_2 (80 dB), the lower level is almost of no influence on the overall level: $L_{res} \approx L_1$ (about 90 dB; exactly 90,4 dB).
- However, if the lower level L_2 occurs more frequently, a mathematical determination of the overall level is required.

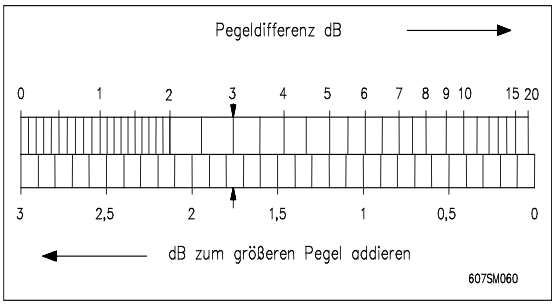


Bild 17: Schema für die energieäquivalente Addition von Schallpegeln

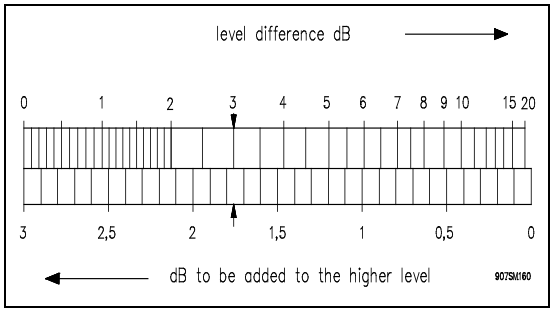


Figure 17: Scheme for the energy-equivalent addition of sound levels

Auf einfache Weise lassen sich Schalldruckpegel mit Hilfe eines Nomogramms (Bild 17) addieren. Ist z. B. L_1 = 90 dB und L_2 = 87 dB, beträgt die Pegeldifferenz 3 dB. Unmittelbar unter dieser Pegeldifferenz wird in der Grafik ein Wert von rund 1,8 dB abgelesen, der zum größten Pegel von 90 dB zu addieren ist. Somit ergibt sich ein Gesamtschalldruckpegel von 91,8 dB. Weitere Schalldruckpegel können nach diesem Verfahren schrittweise addiert werden.

Sound pressure levels can be added with the aid of a monogram (Figure 17) in a simple way. If e. g. L_1 = 90 dB and L_2 = 87 dB, the level difference is 3 dB. Directly below this level difference a value of about 1,8 dB can be read in the scheme. This must be added to the higher level of 90 dB. Resulting is an overall sound pressure level of 91,8 dB. More sound pressure levels can be added step by step using this procedure.

Mittelfrequenz ***Centre frequency*** **Hz**	**Oktavpegel** ***Octave level*** **dB**	**Summenpegel** ***Sum*** **dB**
63	69	
125	74	76,5
250	73	
500	70	77,4
1000	68	78,0
2000	63	78,4
4000	58	78,5
8000	46	

Tabelle 7: Beispiel zur Addition von Einzelpegeln eines Geräuschspektrums

Anmerkung: Pegelwerte werden mit maximal einer Stelle hinter dem Komma angegeben. Dies hat auch nur Sinn bei Zwischenrechnungen mit einer größeren Pegelanzahl, da die Messgenauigkeit von Schallpegelmessern nicht besser ist als ± 1 dB und auch das menschliche Ohr im aller günstigsten Fall, d. h. beim direkten Vergleich zweier Schallergebnisse im Hörversuch, Pegel erst ab einer Differenz von 1 dB in ihrem Wert unterscheiden kann.

Table 7: Example for the addition of individual levels of an overall spectrum

Note: Level values are given with a maximum of one digit behind the comma. Even this makes only sense for intermediate calculations with a higher number of levels, since the measuring accuracy of sound level meters is not better than ± 1 dB and also the human ear can discern levels only from a difference of 1 dB upwards, and this only in the most advantageous case, i. e. by direct comparison of two sound effects in a hearing test.

A2-5.2 Subtraktion von Pegeln

Ist ein zu bestimmender Geräuschpegel L_1 nur wenig größer als ein nicht abstellbarer Fremdgeräuschpegel L_2, der vom Messergebnis nicht berücksichtigt werden soll, sind der Gesamtschallpegel L_{ges} und der Fremdgeräuschpegel L_2 zu messen, um den Geräuschpegel L_1 als Differenz von L_{ges} und L_2 errechnen zu können.

$$L_1 = 10 \cdot \lg\left(10^{0,1 \cdot L_{ges}} - 10^{0,1 \cdot L_2}\right) \text{dB} \qquad (34)$$

Ist z. B. L_{ges} = 84 dB and L_2 = 80 dB, ergibt sich als Geräuschpegel:

A2-5.2 Subtraction of levels

If a sound level L_1 to be determined is only slightly higher than a foreign noise level L_2, which cannot be switched off and which is not supposed to influence the measuring result, the overall sound level L_{res} and the foreign noise level L_2 must be measured to calculate the sound level L_1 as a difference between L_{res} and L_2.

$$L_1 = 10 \cdot \lg\left(10^{0,1 \cdot L_{res}} - 10^{0,1 \cdot L_2}\right) \text{dB} \qquad (34)$$

If e. g. L_{res} = 84 dB and L_2 = 80 dB, the resulting sound level is:

$$L_1 = 10 \cdot \lg\left(10^{0,1 \cdot 84} - 10^{0,1 \cdot 80}\right) \text{dB} = 81{,}8 \text{ dB}$$

Einschlägige Regelwerke lassen diese Berechnung nur bei einer Pegeldifferenz $L_1 - L_2 \geq 3$ dB zu, da bei kleineren Differenzen eine Zuordnung von Fremdgeräuschen, Störgeräuschen und Gesamtgeräusch z. B. aufgrund der Pegelgleichheit nicht gegeben ist.

Calculation manuals commonly in use allow for this calculation only at a level difference $L_1 - L_2 \geq 3$ dB, since for lower differences the allocation of foreign noises, disturbing noise and overall noise e. g. as a result of the level similarity is impossible.

A2-5.3 Räumliche und zeitliche Mitteilung von Pegeln

Schallfelder schwanken in der Regel sowohl zeitlich als auch örtlich. Je nach Fragestellung sucht man entweder den zeitlichen Mittelwert des Schallpegels an einem festen Ort oder den räumlichen Mittelwert von einem zeitlich relativ konstanten Schallpegel.

Typische Beispiele für den ersten Fall sind der zeitliche Mittelwert des Lärmpegels an einem bestimmten Arbeitsplatz über die Dauer einer typischen Arbeitsperiode oder der durch Lärmquellen in der Nachbarschaft während der Nachtzeit verursachte Mittelwert des Schallpegels vor einem geöffneten Fenster.

Räumliche Mittelwerte von zeitlich relativ konstanten Pegeln werden z. B. bei der akustischen Beurteilung von Bauteilen, der Erprobung von schallabsorbierenden Materialien oder der Kennzeichnung der Lärmerzeugung von Maschinen benötigt.

In der Schallemission werden Schalldruckpegel verschiedener Messpunkte zu einem räumlich gemittelten Schalldruckpegel zusammengefasst. Da Pegel logarithmische Größen sind, ist eine arithmetische Mittelung im Allgemeinen nicht zulässig. Um die Auswertung jedoch zu vereinfachen, ist die arithmetische Mitteilung der Pegel dann erlaubt, wenn die Differenz zwischen dem auftretenden Größt- und Kleinstwert 6 dB nicht überschreitet (→ Fehler < 1 dB).

A2-5.3 Space and time averaging of levels

Sound areas normally vary both over time and over space. Dependent upon the question, one seeks either an average value of the sound level over time at a given position or an average value in the space considered of a sound level that is relatively constant over time.

Typical examples for the first case are the average value over time of a sound level at a defined workplace over the duration of a typical working shift or the average value of a sound level at an open window caused by noise sources in the neighbourhood during night time.

Average values in the space considered of a sound level that is relatively constant over time are required e. g. for the acoustical assessment of building components, the testing of sound-absorbing materials or the classification of noise emission by machines.

For noise emissions, the sound pressure levels of different measuring points are combined into an average sound pressure level for the space considered. Since levels are logarithmic values, an arithmetical averaging is normally not allowed. However, to simplify the calculation as far as possible, the arithmetical averaging of levels can be accepted if the difference between the occurring maximum and minimum levels does not exceed 6 dB (→ mistake < 1 dB).

Bei größeren Pegeldifferenzen ist eine energieäquivalente Mittelung der einzelnen Schalldruckpegel nach folgender Gleichung vorzunehmen:

For higher level differences, an energy-equivalent averaging of the individual sound pressure levels is required according to the following equation:

$$L_m = 10 \lg \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} 10^{0,1 \cdot L_i} \right] \text{dB} \qquad (35)$$

wobei L_m der Mittelungspegel ist, L_i sind die einzelnen Schalldruckpegel (L_1, L_2, …, L_n) und n ist die Anzahl der Schalldruckpegel.

where Lm is the average level, L_i are the individual sound pressure levels (L_1, L_2, …, L_n) and n is the number of sound pressure levels.

Beispielsweise beträgt der Mittelungswert dreier Einzelpegel von 90, 84 und 80 dB

For example, the average level of three individual levels of 90, 84 and 80 dB is

$$L_m = 10 \lg \left[\frac{1}{3} \left(10^{0,1 \cdot 90} + 10^{0,1 \cdot 84} + 10^{0,1 \cdot 80} \right) \right] \text{dB} = 86{,}5 \text{ dB}$$

Nur wenige Schallereignisse sind über den jeweils interessierenden Zeitraum in ihrem Pegelwert konstant, zeitlich schwankende Pegel sind vor allem bei der praktischen Erfassung von Lärmsituationen die Regel. Man ist deshalb in vielen Fällen auf die Bildung eines zeitlichen Mittelwertes (energieäquivalenten Dauerschallpegels L_{Aeq}) angewiesen.

Only few sound effects are constant in their level value over the interesting period. On the contrary, levels varying over time are the rule, especially in the practical investigation of noise situations. One is therefore obliged in many cases to form the average value over time (energy-equivalent continuous sound level L_{Aeq}).

Bei einem im Pegel nicht schwankenden Geräusch (z. B. Rauschen) ist der Mittelungspegel gleich dem Momentanwert, der von dem Schallpegelmesser abgelesen werden kann.

For a sound that is generally not varying in its level (e. g. random noise), the average level is equal to the momentary level which can be read from the sound level meter.

Bei impulsfreien Geräuschen mit gering schwankenden Pegeln bis zu 5 dB(A) lässt sich der Mittelungswert etwa in Mitte des Schwankungsbereichs ansetzen.

With noises that are free of impulses and have only slightly varying levels up to 5 dB(A), the average level can be assumed to be in the middle of the variation range.

Wenn der Geräuschpegel bis etwa 10 dB(A) schwankt und keine Häufung der Messwerte in der Nähe der unteren oder oberen Grenze des Schwankungsbereichs festgestellt werden kann, liegt der Mittelungspegel um etwa 1/3 des Schwankungsbereichs unterhalb der oberen Grenze.

If the sound level varies with about 10 dB(A) and no accumulation of measuring values in the vicinity of the lower or upper limit of that variation range can be established, the average level lies about 1/3 of the variation range below the upper limit.

Sind größere Schwankungsbereiche als 10 dB(A) festzustellen, versagen die o. a. Verfahren. In diesen Fällen sind integrierende Schallpegelmesser notwendig, die die zeitliche Mittelung mit hohen Abtastraten realisieren. An integrierenden Geräten kann der Mittelungswert für beliebig schwankende Geräusche in der Regel unmittelbar nach Beginn der Messung abgelesen werden.

Where larger variation ranges than 10 dB(A) are established, the a. m. procedures fail. In these cases, integrating sound level meters are required which realise the averaging over time through high rates of detection. On integrating measuring devices the average level can be read immediately after the start of the measurement for any variation range of noises.

A2-5.4 Beurteilungspegel

A2-5.4 Noise rating levels

Der Beurteilungspegel $L_{Ar,T}$ nach ISO 1996-1 ist ein Maß für die mittlere Geräuschimmission am Aufenthaltsort von Menschen während einer gegebenen Beurteilungszeit T. Er setzt sich aus dem äquivalenten A-Dauerschallpegel L_{Aeq} und verschiedenen Zuschlägen für Impulshaltigkeit K_i und Tonhaltigkeit KT zusammen. Allgemein gilt für Nachbarschaftslärm und Lärm am Arbeitsplatz:

The noise rating level $L_{Ar,T}$ according to ISO 1996-1 is a measurement for the average emission at the whereabouts of men during a given weighting time T. It is composed of the equivalent A-continuous sound level L_{Aeq} and differing additions for impulse content K_i and sound content K_T. Generally, to neighbourhood noise and noise at the workplace, the following applies:

$$L_{Ar,T} = L_{Aeq} + K_i + K_T \qquad (36)$$

Als Messgrößen finden hierbei der AF-Schalldruckpegel L_{AF}, der AS-Schalldruckpegel L_{AS}, der AI-Schalldruckpegel L_{AI} oder der Taktmaximalpegel L_{AFT} Verwendung, wobei die beiden letztgenannten Messgrößen den Impulszuschlag K_i enthalten.

As measuring values, the AF sound pressure level L_{AF}, the AS sound pressure level L_{AS}, the AI sound pressure level L_{AI} or the clock-pulse maximum level L_{AFT} are being used, where the two last mentioned measuring values contain the impulse addition K_i.

Der Impulszuschlag ergibt sich aus der Differenz zwischen dem AI-bewerteten Dauerschallpegel L_{AIeq} oder dem Taktmaximal-Mittelungspegel L_{AFTeq} und dem äquivalenten Dauerschallpegel L_{Aeq}.

The impulse addition is calculated form the difference between the AI-weighted continuous sound level L_{AIeq} or the clock-pulse maximum average level L_{AFTeq} and the equivalent continuous sound level L_{Aeq}.

$$K_i = L_{AIeq}, L_{AFTeq} - L_{Aeq} \qquad (37)$$

Der Tonzuschlag K_T soll die erhöhte Störwirkung von Geräuschen mit Einzeltönen berücksichtigen. Er ist entweder messtechnisch zu ermitteln oder in Abhängigkeit von der subjektiven Wahrnehmung festzulegen, wobei Zuschläge von 3 dB oder 6 dB angewendet werden.

The sound addition K_T is supposed to reflect the increasingly irritating effect of noises with individual tones. It is either established by measurements or to be established in dependence of the subjective perception, where additions of 3 dB or 6 dB are being used.

Für die Ermittlung des Beurteilungspegels gilt im Allgemeinen die folgende Gleichung:

For the establishment of the weighted level, generally the following equation applies:

$$L_{Ar,T} = 10 \lg \left[\frac{1}{T} \left(\sum_{1}^{n} T_i \, 10^{0,1\left(L_{Aeq,i} + K_{T,i} + K_{I,i}\right)} \right) \right] \qquad (38)$$

Beurteilungszeiten T sind für Immissionen:

- am Arbeitsplatz 8 Stunden
- in der Nachbarschaft
  tags (6.00 – 22.00 Uhr): 16 Stunden
  nachts (lauteste Stunde zwischen 22.00 – 6.00 Uhr): 1 Stunde

Anmerkung: Sowohl die Beurteilungszeiten als auch die Anwendung der Zuschläge sind in den verschiedenen Verordnungen (auf Länderebene) und Regelwerken unterschiedlich festgesetzt.

Weighting times T are for emissions:

- at the workplace 8 hours
- in the neighbourhood
  during daytime (6.00 – 22.00 h): 16 hours
  during night time (noisiest hour between 22.00 and 6.00 h): 1 hour

Note: The weighting periods as well as the use of additions are given differently in the different appropriate directives (at state level) and in calculation manuals.

Zur Beurteilung der Gehörschädlichkeit von Arbeitslärm wird der auf 8 h bezogene äquivalente Dauerschallpegel L_{Aeq} verwendet, in der UVV Lärm 8-Stunden-Beurteilungspegel L_{Ard} genannt. Bei erheblichen Schwankungen der täglichen Lärmexposition darf der wöchentliche Mittelwert L_{Arw}, gebildet über die fünf einzelnen Tageswerte L_{Ard}, angewendet werden.

For the assessment of the hearing damaging effect of work noise, the continuous sound level L_{Aeq} related to 8 h is being used. In the UVV Noise it is called 8-hours assessment level L_{Ard}. Where considerable variations of the daily noise exposure occur, the weekly average value L_{Arw} may be established and be used for the five individual day values L_{Ard}.

A2-5.5 Äquivalente Dauerschallpegel / Mittelungspegel

Häufig werden die statistischen Änderungen über die Zeit benutzt, um z. B. ein Verkehrsgeräusch oder den Lärm industrieller Einrichtungen, die sich über die Zeit ändern, einzuschätzen.

Um dies zu erreichen, wird der tatsächliche Pegelwert, der sich über die Zeit ändert, in gleichmäßigen Abständen gemessen und allgemein nach dem Pegelwert klassifiziert.

Die Darstellung statistischer Lautstärken geschieht meist in Form der Gesamtfrequenzverteilung (Gesamtfrequenzpegel).

A2-5.5 Level statistics

Frequently, the statistic of changes over time is used to assess the noise which is caused by traffic or industrial installations and which changes over time.

To do this, the actual value of the level changing over time is measured in constant intervals and classified generally according to the level volume.

The presentation of statistical volumes takes place most frequently in the form of total frequency distributions (total frequency levels).

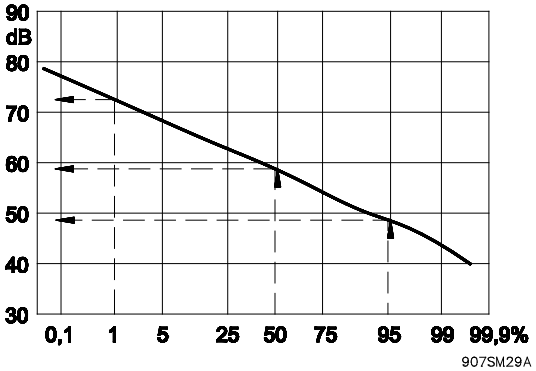


Bild 18: Gesamtfrequenzkurve eines Verkehrsgeräusches (Abstand 15 m – 1200 Autos/h)

Figure 18: Total frequency curve for traffic noise (distance 15 m – 1200 cars/h)

Der Gesamtfrequenzpegel $L_{AN,T}$ (nach ISO 1996/1) ist derjenige Lärmpegel, der während eines definierten Anteils der gesamten Messzeit eines Lärmtests erreicht oder überschritten wird und der als Index festgehalten wird.

Von besonderer Bedeutung sind:

- $L_{A95,1h}$ bzw. $L_{A90,1h}$ sind Pegel, die erreicht oder überschritten werden in 90 % bzw. 95 % der gemessenen Zeit T = 1 h. Dieser Pegel ist besonders typisch wegen des hohen Zeitanteils und er wird deswegen auch allgemeiner Geräuschpegel genannt. Beispiel aus dem obigen Diagramm: $L_{A95,1h}$ = 49 dB(A).

The total frequency level $L_{AN,T}$ (according to ISO 1996/1) is the noise level which is reached or transgressed in a defined percentage of the entire measuring time of an acoustical test and which is noted in the form of an index.

Of special importance are:

- $L_{A95,1h}$ or $L_{A90,1h}$ – levels which are reached or transgressed in 90% or 95% of the measuring time T = 1 h. It is especially typical and representative because of its high index percentage value and is therefore also called general noise level. Example from the above diagram: $L_{A95,1h}$ = 49 dB(A).

- $L_{A50,1h}$ ist der Pegel, der in 50 % der Messzeit erreicht oder überschritten wird. Er wird daher mittlerer Geräuschpegel genannt. Beispiel aus dem obigen Diagramm: $L_{A50,1h}$ = 59 dB(A).
- $L_{A1,1h}$ ist der Pegel, der während 1 % der Messzeit erreicht oder überschritten wird. Er wird Maximalpegel genannt.

- $L_{A50,1h}$ is the level which is reached or transgressed in 50% of the measuring time and is called medium noise level. Example from the above diagram: $L_{A50,1h}$ = 59 dB(A).
- LA1,1h is the level which is reached or transgressed in 1% of the measuring time and is called maximum noise level.

A2-6 Bedeutung von Symbolen, Einheiten und Größen

A2-6 Meaning of symbols, units and abbreviations

Symbol	**Größe** ***Quantity***	**Einheit** ***Unit***	**Seite** ***Page***	**Bemerkungen Quelle** ***Remarks Source***
A	äquivalente Absorptionszone einer Oberfläche, eines Objektes oder eines Raumes *equivalent absorption area of a surface, an object or a room*	m^2	19	ISO 31-7
c	Schallgeschwindigkeit *speed of sound*	m/s	3, 4, 10, 11, 17, 18, 20	EN 12354-1
c_0	Schallgeschwindigkeit in Luft bei 20 °C und 1 bar (≈ 340 m/s) *speed of sound in air at 20 °C and 1 bar (≈ 340 m/s)*	m/s	11	
c_B	Biegewellengeschwindigkeit *bending wave velocity*	m/s	11	
c_L	Longitudinalwellengeschwindigkeit *longitudinal wave velocity*	m/s	11	
d	Entfernung, Tiefe *distance, depth*	m	11, 19	
D_S	Abstandsmaß = $10\lg\frac{S}{S_0}$ *area term* = $10\lg\frac{S}{S_0}$	dB	19, 21	
f	Frequenz (Schwingungen pro Sekunde) *frequency (cycle per second)*	Hz	3, 4, 10, 26	EN 12354-1
f_1, f_2	untere und obere Frequenzgrenze *lower and upper frequency limit*	Hz	14	
f_m	Mittelfrequenz *mean frequency*	Hz		
I	Schallintensität *sound intensity*	W/m^2	17, 18, 20, 21	ISO 31-7
i, n	Zählvariable *counting variable*	ohne Dimension *without dimension*	20, 29	
I_0	Bezugsschallintensität, entspricht 1 pW/m^2 *reference sound intensity, is equal to 1 pW/m^2*	W/m^2	18, 20, 21	
K_I	Impulszuschlag *addition for impulsiveness*	dB	29, 30	
K_T	Tonzuschlag *addition for individual tones*	dB	29, 30	
l	Länge *length*	m	18, 19	
L (= L_p)	Schalldruckpegel *sound-pressure level*	dB, Bezugswert / *reference value* 20 μPa	7, 15, 16, 17, 19, 20, 22, 23	ISO 31-7
L_A	A-bewerteter Schallpegel *A-weighted sound-pressure level*	dB, Bezugswert / *reference value* 20 μPa	26	
L_{Aeq}	A-bewerteter äquivalenter Dauerschallpegel *A-weighted average equivalent sound-pressure level*	dB	29	EN 12354-3
L_{AFT}	AF-bewerteter Taktmaximalpegel *AF-weighted clock-pulse maximum pressure level*	dB	29	
L_{AFTeq}	AF-bewerteter Taktmaximal-Mittelungspegel *AF-weighted average equivalent sound-pressure level*	dB	29	
L_{AI}, L_{AF}, L_{AS}	mögliche Messwerte für A-bewertete Schallpegel *possible measuring values for the A-weighted sound-pressure level*	dB	21	
L_{AIeq}	AI-bewerteter Dauerschallpegel *AI-weighted continuous sound level*	dB	29	
$L_{AN,T}$	A-bewerteter zeitanteiliger Pegel *A-weighted percentage level*	dB	31	ISO 1996-1
$L_{Ar,T}$	A-bewerteter Beurteilungspegel *A-weighted noise rating level* *time average*	dB	30	ISO 1996-1

Symbol	**Größe** ***Quantity***	**Einheit** ***Unit***	**Seite** ***Page***	**Bemerkungen Quelle** ***Remarks Source***
L_{Ard}	A-bewerteter Beurteilungspegel über 8 h / Tagesdurchschnittswert *A-weighted noise rating level* *8 h / daily average value*	dB	30	UVV-Lärm
L_{Arw}	A-bewerteter Beurteilungspegel Wochendurchschnittswert *A-weighted noise rating level* *weekly average value*	dB	30	UVV-Lärm
L_d	Schallpegel im Abstand d *sound-pressure level at the distance d*	dB	19	
L'_d	Schallpegel je Meter Länge im Abstand d *sound-pressure level per meter length at the distance d*	dB	19	
L_{eq}	energieäquivalenter Dauerschallpegel pro Zeiteinheit *energy-equivalent permanent sound level over time*	dB	22, 26	
L_F	Schallpegel "schnell" *sound-pressure level "fast"*	dB	22	
L_{Fm}	energieäquivalenter Dauerschallpegel "schnell" *energy-equivalent permanent sound level "fast"*	dB	22	
L_{FTm}	durchschnittlicher maximaler Impulspegel "schnell" *average clock-pulse maximum level "fast"*	dB	22	
l_I	Schallintensitätspegel *sound-intensity level*	dB Bezugswert / *reference value* 1 pW/m^2	15, 18, 19, 20, 21	
L_{Im}	energieäquivalenter Dauerschallpegel "Impuls" *energy-equivalent permanent sound level "impulse"*	dB	22	
L_m	energieäquivalenter Schallpegel aus verschiedenen Quellen *energy-equivalent sound level of several sources*	dB	29	
L_N	Lautstärke *loudness level*	dB Bezugswert / *reference value* 20 μPa	25	ISO 31-7
$L_p \rightarrow L$				
L_r	Lautstärkepegelabstufung *noise rating level*	dB	7	
L_{res}	resultierende Lautstärke *resulting sound level*	dB	26, 27, 28	
L_{Sm}	energieäquivalenter Dauerschallpegel "slow" *energy-equivalent permanent sound level "slow"*	dB	22	
L_v	Schallschnellepegel *level of sound-particle velocity*	dB Bezugswert / *reference value* $5 \cdot 10^{-8}$ m/s	17	
L_w	Schallleistungspegel *sound-power level*	dB, Bezugswert / *reference value* 1 pW	18, 19	
L'_W	linienbezogener Schallleistungspegel je 1 m gleichmäßig strahlender Schallquelle *level of sound power per meter evenly radiating sound source*	dB	19	
L''_W	flächenbezogener Schallleistungspegel je 1 m^2 gleichmäßig schallabstrahlender Fläche *level of sound power per 1 m^2 evenly radiating sound source*	dB	19	
$p = p_{eff}$	Quadratwurzel des Schalldruckwertes *root-mean-square value of sound pressure*	Pa	3, 7, 15, 16, 17, 18, 20	ISO 31-7
p_0	Bezugsschalldruck entsprechend 20 μPa *reference sound pressure is equal to 20 μPa*	Pa	15, 17, 20	ISO 31-7
p_A	Gesamtschalldruck *total sound pressure*	Pa	16, 17	ISO 31-7
p_n	statischer Druck – Standardbedingung *static pressure – standard condition*	Pa	10	
p_{operat}	statischer Druck – Betriebsbedingungen *static pressure – operating condition*	Pa	10	
p_s	statischer Druck static pressure	Pa	10	ISO 31-7
r, r_0, r_1, r_2	Radius *radius*	m	18	
s	Abstand, geometrischer Wert *distance, geometric value*	m	17	
S	Oberfläche *surface*	m^2	18, 19, 20, 21	
S	Lautheit *sonority*	sone	26	

Symbol	**Größe** ***Quantity***	**Einheit** ***Unit***	**Seite** ***Page***	**Bemerkungen Quelle** ***Remarks Source***
S_0	Bezugswert für Fläche (1 m^2) *reference value of area (1 m^2)*	m^2	21	
t	Zeit *time*	s	11, 13, 16, 26	
T	Schwingungszeit, Wichtungszeit, Intervall *reverberation time, weighting time, period*	s	10, 16, 19	ISO 31-7
t_B	Bezugsintervall *reference time period*	s	26	
t_{up}, t_{down}	Zeitkonstante für Schalldruckskalenmaßstäbe: Impuls, schnell, langsam *time constants for scales for sound level gauges; impulses, fast, slow*	s	21, 22	
v	Schallschnelle *sound-particle velocity*	m/s	17	
V	Kammervolumen *chamber volume*	m^3	19	
$v \rightarrow v_{eff}$				
v_0	Bezugswert der Schallschnelle, entspricht $5 \cdot 10^{-8}$ m/s *reference value of sound-particle velocity, is equal to $5 \cdot 10^{-8}$ m/s*	m/s	17, 20	
w	Schallenergiedichte *density of sound energy*	$W \cdot s/m^3$	17, 18	
W	Schallleistung *sound power*	W	18, 19, 20, 21	EN ISO 3746
W_0	Bezugswert der Schallleistung, entsprechend 1 pW *reference value of sound power, is equal to 1 pW*	W	18, 19, 21	
W_l	linienbezogene Schallleistung je 1 m gleichmäßig strahlender Schallquelle *sound power per meter evenly radiating sound source*	W/m	18	
W_S	Schallleistung einer ebenen Schallquelle *sound power of a flat source*		18	
x	Entfernungsvariable *variable of distance*		18	
x_0	partieller Abstand *partial distance*		18	
κ	adiabatischer Exponent *adiabatic exponent*	ohne Dimension *without dimension*	10, 11	
λ	Wellenlänge *wavelength*	m	4, 10	ISO 31-7
λ_L	Länge einer Longitudinalwelle *length of longitudinal wave*	m	9	
λ_T	Länge einer Transversalwelle *length of transversal wave*	m	9	
ϑ_n	Temperatur – Standardbedingung *temperature – standard condition*	°C	11	
ϑ_{operat}	Temperatur – Betriebsbedingungen *temperature – operating condition*	°C	11	
θ_n	Temperatur – Standardbedingung *temperature – standard condition*	K	10	
θ_{operat}	Temperatur – Betriebsbedingungen *temperature – operating condition*	K	10	
ρ	Massevolumen, Dichte *volumic mass, density*	kg/m^3	17, 20	ISO 31-7
ρ_n	Massevolumen, Dichte bei 20 °C und 1 bar *volumic mass, density at 20 °C and 1 bar*	kg/m^3	10, 11	
ρ_{operat}	Massevolumen, Dichte bei ϑ_{operat} und ρ_{operat} *volumic mass, density at ϑ_{operat} and ρ_{operat}*	kg/m^2	10	
$\varpi = 2 \cdot \pi \cdot f$	Winkelabstand *angular distance*	1/s	16	

A2-7 Normen und Literatur / Quellen

A2-7 Standards and literature / Sources

DIN EN 27574-1	1989-03-00	Akustik – Statistische Methoden zur Bestimmung und Überprüfung von Schallemissionsnennwerten von Werkzeugen und Maschinen – Teil 1: Allgemeine Feststellungen und Definitionen (identisch mit ISO 7574-1:1985) Deutsche Fassung: EN 27574-1:1988 *Acoustics – Statistical methods for determining and verifying stated noise emission values of machinery and equipment – Part 1: General considerations and definitions* *(identical with ISO 7574-1:1985)* German version: EN 27574-1:1988
DIN IEC 60268-1	1988-07-00	Schallsystemwerkzeug – Allgemeines (identisch mit IEC 60268-1:1985 (Status *ab* 1988)) Sound system equipment – General *(identical with IEC 60268-1:1985 (status as of 1988))*
DIN IEC 60268-2	1994-08-00	Schallsystemwerkzeug – Teil 2: Erklärung allgemeiner Ausdrücke und Berechnungsmethoden (IEC 60268-2:1987 + A1:1991) (Deutsche Fassung: HD 483.2 S2:1993) *Sound system equipment – Part 2: Explanation of general terms and calculation methods* *(IEC 60268-2:1987 + A1:1991)* *(German version: HD 483.2 S2:1993)*
E DIN ISO 10845	1995-10-00	Akustik – Frequenzwichtung "A" für Schallmessungen (ISO/DIS 10845:1995) Acoustics – Frequency weighting "A" for noise measurement *(ISO/DIS 10845:1995)*
EN 21683	1994-06-00	Akustik – Vorzugs-Bezugsgrößen für Schallpegel (ISO 1683:1983) Acoustics – Preferred reference quantities for acoustic levels *(ISO 1683:1983)*
EN 28798	1991-10-00	Akustik – Bezugspegel für Schmalbandüberdeckungsgeräusche (identisch mit ISO 8798:1987) Acoustics – Reference levels of narrow-band masking noise *(identical with ISO 8798:1987)*
ISO 16	1975-01-00	Akustik – Standardabstimmungsfrequenz (Standardmusiktonhöhe) *Acoustics – Standard tuning frequency (standard musical pitch)*
ISO 31-2	1992-09-00	Größen und Einheiten – Teil 2: Periodische und ähnliche Phänomene Quantities and units – Part 2: Periodic and related phenomena
ISO 31-7	1992-09-00	Größen und Einheiten – Teil 7: Akustik Quantities and units – Part 7: Acoustics
ISO 226	1987-05-00	Akustik – Standardpegelverläufe bei gleichmäßiger Lautstärke Acoustics – Normal equal-loudness level contour
ISO 266	1987-04-00	Akustik – Vorzugsfrequenzen Acoustics – Preferred frequencies
ISO 1683	1983-10-00	Akustik – Vorzugs-Bezugsgrößen für Schallpegel Acoustics – Preferred reference quantities for acoustic levels
ISO 1996-1	1982-09-15	Akustik – Beschreibung und Messung von Umweltlärm – Teil 1: Standardgrößen und –verfahren *Acoustics – Description and measurement of environmental noise – Part 1: Basic quantities and procedures*
ISO 2533	1975-05-00	Standardatmosphäre Standard atmosphere
ISO 7196	1995-03-00	Akustik – Frequenzwichtungskennzeichen für Infraschallmessungen *Acoustics – Frequency-weighting characteristic for infra-sound measurements*
TA-Lärm		Technische Anweisungen für Schallschutz Technical instructions for noise protection
UVV, VBG 121		Unfallverhütungsvorschrift Lärm; Herausgeber: Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften *Safety precautions Noise; editor: Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften*

A2-8 Einführung in die Folgedokumente

A2-8 Introduction in the following documents

A2-8.1 Hindernisse für die Ausbreitung von Luftschallwellen

Die akustische Schallwelle beginnt ihre Ausbreitung an der Lärmquelle. Wenn sie ein Hindernis trifft, z. B. eine Wand, wird ein Teil der mitgeführten Energie durch das Hindernis reflektiert, ein anderer Teil wird durch Verteilung im Hindernis absorbiert und ein letzter Teil breitet sich durch das Hindernis bis zu dessen anderer Seite aus.

A2-8.1 Obstacles to the propagation of airborne acoustic waves

The acoustic sound waves start their journey at the sound source. When they hit an obstacle, e. g. a wall, a part of the energy they carry is reflected by the obstacle, another part is absorbed by distribution in the obstacle and a last part travels through the obstacle to its other end.

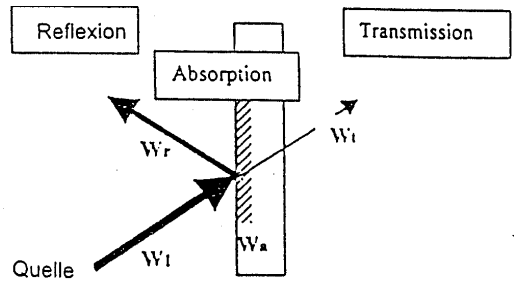


Bild 19: Wenn eine Schallwelle ein Hindernis trifft, treten Reflektion, Absorption und Übertragung der Schallenergie auf

Wenn W_1 die Schallleistung ist, die das Hindernis trifft, dann ist $W_1 = W_r + W_a + W_t$.

Das Hindernis wird durch drei Faktoren charakterisiert:

- Der Reflektionsfaktor $r = \frac{W_r}{W_1}$, das Verhältnis der reflektierten Schallleistung zur ursprünglich aufgetretenen Schallleistung.
- Der Absorptionsgrad $\alpha = \frac{W_a}{W_1}$, das Verhältnis der absorbierten Schallleistung zur ursprünglich aufgetretenen Schallleistung.
- Der Übertragungsfaktor $\tau = \frac{W_t}{W_1}$, das Verhältnis der hindurch tretenden Schallleistung zur ursprünglich aufgetretenen Schallleistung.

Anmerkung: In der Mehrzahl der Fälle ist der Übertragungsfaktor im Verhältnis zum Reflektions- und Absorptionsfaktor sehr klein.
$r + \alpha + \tau = 1$ mit $\tau << (r + \alpha)$ und $(r + \alpha) \equiv 1$

A2-8.2 Schlussfolgerungen: Bestimmung der akustischen Eigenschaften von Baumaterial und Bauteilen

Das Problem besteht insbesondere in der Bestimmung der Absorptions- und Übertragungsfaktoren von Bauprodukten. Um dies zu erreichen, ist es nötig, die physikalischen Eigenschaften der Materialien zu kennen, die deren Schallverhalten bestimmen, wie ihre Masse, ihre innere Dämpfung, ihren Strömungswiderstand, ihren Elastizitätsmodulus, usw.

Schließlich muss der Planer die Bedeutung der akustischen Werte kennen, welche die akustische Leistung derjenigen Produkte bestimmt, die für die verschiedenen Problemstellen der Gebäudeakustik benutzt werden, und er muss sich ihrer zu bedienen wissen.

Dieses Problemfeld wird der Inhalt des Dokuments **A3 „Eigenschaften von Baustoffen – Schalldämmung, Absorption, Dämpfung“** sein.

A2-8.3 Das Gebiet der Gebäudeakustik

A2-8.3.1 Schallausbreitung in der Umgebung der Schallquelle

An jedem Punkt wird der Energie, die von der Wand reflektiert worden ist, diejenige Energie hinzugefügt, die diesen Punkt direkt von der Schallquelle aus erreicht. Die Anwesenheit der Wand hat den Effekt der Erhöhung des Schalldrucks.

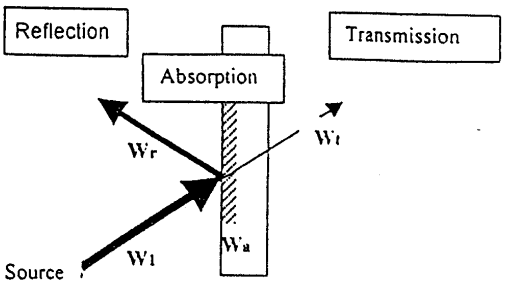


Figure 19: When a sound wave meets an obstacle, reflection, absorption and transmission of the acoustical energy occur

If W_1 is the acoustical power hitting the obstacle, then $W_1 = W_r + W_a + W_t$.

The obstacle is characterised by three factors:

- The reflection factor $r = \frac{W_r}{W_1}$, ratio of the reflected acoustical power to the initial acoustical power.
- The absorption factor $\alpha = \frac{W_a}{W_1}$, ratio of the acoustical power absorbed to the initial acoustical power.
- The transmission factor $\tau = \frac{W_t}{W_1}$, ratio of the transmitting acoustical power to the initial acoustical power.

Note: In the majority of cases, the transmission factor is very weak by comparison to the reflection and absorption factors.
$r + \alpha + \tau = 1$ with $\tau << (r + \alpha)$ and $(r + \alpha) \equiv 1$

A2-8.2 Consequences: Determination of acoustical characteristics of building materials and building elements

The problem is to determine especially the absorption and transmission factors of building products. To achieve this, it is necessary to know the physical characteristics of the materials influencing that behaviour, such as the mass, the internal attenuation, the air flow resistance, the elasticity modulus, etc.

Finally, the designer must know the significance and the way to utilise the acoustical values that govern the acoustical performance of those products which must be used to treat the different areas of acoustics in buildings.

This problem area will be the content of the document **A3 “Product characteristics – Acoustic insulation, absorption, attenuation”**.

A2-8.3 The area of acoustics in buildings

A2-8.3.1 Propagation of sound in the vicinity of the sound source

In any point, the energy reflected from a wall is added to the energy which reaches that point directly from the sound source. The presence of that wall has the effect of increasing the sound pressure.

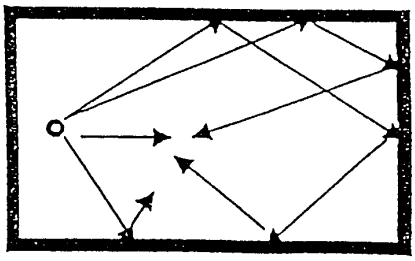


Bild 20: In einem Raum wird die Reflektion durch die Wände dem Schall hinzugefügt, der direkt von der Schallquelle stammt

Figure 20: In a room, the reflection by the walls is added to the sound coming directly from the sound source

Der erreichte Schallpegel kann störend sein (z. B. bei Maschinengeräuschen). Man kann ihn mindern, indem man an den Wänden Materialien anbringt, die durch einen hohen Absorptionsfaktor gekennzeichnet sind. Zusätzlich sollte sich die zu schützende Zone nicht zu nah bei der Schallquelle befinden; in diesem Fall müssten andere Lösungen gewählt werden, z. B. akustische Schilde. All dies ist das Problem der Schallverteilung in einem Raum, in dem sich eine Schallquelle befindet. Dieses Gebiet wird im Dokument **A4 „Akustik in Gebäuden“** behandelt und der abnehmende Schallpegel in einem Raum wird in den Dokumenten **A5 „Akustik in Räumen“** und **A6 „Akustik in der Industrie“** dargelegt.

The level reached can be irritating (e. g. in case of noise generated by a machine). One can lower it by placing materials on the walls which are characterised by a relatively high absorption factor. Additionally, the zone to be protected should not be too near to the sound source, in which case other solutions should be used, e. g. acoustical shields. All this is a problem of a sound distribution in a room, in which a sound source is located. This problem area will be dealt with in the document **A4 “Acoustics in buildings”**, and a study of the diminishing of the noise level in a room will be put forward in the documents **A5 “Acoustics in rooms”** and **A6 “Industrial acoustics”**.

Wenn die Wände eines Raumes sehr gut reflektieren, kann der Schallpegel an einem gegebenen Punkt als Ergebnis der Reflektionen von den Wänden hoch genug sein, um den Schall, der direkt von der Quelle kommt, zu überdecken. Wenn es nötig ist, die Schallquelle direkt wahrzunehmen, wie in Konferenzräumen oder Auditorien, ist es erforderlich, die reflektierte Schallenergie zu mindern. Im Gegensatz dazu kann man die Bedingungen der Schallausbreitung im Freien dadurch erreichen, dass man die Wände mit sehr schallabsorbierendem Material überzieht. Dann nimmt der Schallpegel mit der Entfernung von der Quelle ab.

If walls in a room are very reflective, the noise level at a given point as a consequence of the reflections from the walls could be high enough to mask the noise that comes directly from the source. If one needs to listen to the source, as in conference rooms or auditoria, it is necessary to diminish the energy reflected from the walls. On the contrary, if one covers all the walls with a very absorbing material, one finds oneself in the conditions of noise propagation in the open and the sound level decreases as one goes away from the source.

Um eine Schallquelle gut wahrnehmen zu können, ist es erforderlich, absorbierende und reflektierende Materialien zu kombinieren; man muss die akustischen Bedingungen in einem Raum seiner Funktion anpassen. Dieses Problem muss in Konferenzräumen, Übungshallen, Konzertsälen, usw. beherrscht werden. Diese Aspekte werden im Dokument **A4 „Akustik in Gebäuden“** untersucht werden.

To be able to well listen to a sound source, it is necessary to combine absorbing and reflecting materials; one must effect an adjustment of the acoustical conditions in a room regarding to its function. This is a problem to be treated in conference rooms, training audiences, concert halls, etc. These aspects will be examined in the document **A4 “Acoustics in buildings”**.

A2-8.4 Eindringen von Schall in Räume, die dem Raum mit der Schallquelle benachbart sind

A2-8.4 Transmission of sound into rooms neighbouring the one where the sound source is located

Das Problem besteht hier in der Minderung des Übertragungsfaktors in Wänden, um eine akustische Isolierung zwischen dem Gebiet der Schallentstehung und demjenigen der Schallaufnahme herzustellen.

The problem is to diminish the transmission factor in walls to effect an acoustical insulation between the area of emission and the area of reception of the sound.

Zu diesem Problem gehört auch die Beherrschung aller zusätzlichen Schallausbreitungswege, wie Klimaanlagen, Kanäle, Kanalisationsschächte und Ähnliches.

This is also a problem of mastering all the additional avenues of sound propagation, such as air-conditioning systems, ducts, canalisation pipes and others.

Dieses Bündel von Problemen wird in den Dokumenten **A4 „Akustik in Räumen“**, **A5 „Akustik in Gebäuden“** und **A6 „Akustik in der Industrie“** behandelt werden.

This bunch of problems shall be treated in the documents **A4 “Acoustics in rooms”**, **A5 “Acoustics in buildings”** and **A6 “Industrial acoustics”**.

A2-8.5 Besondere Probleme der Schalleinleitung ins Freie aus Räumen oder Gebäuden

A2-8.5 Special problems of the transmission of a noise from a room or a building into the open

Diese Problemstellung umfasst folgende Teilprobleme:

- Schallausbreitung im Gebäude und seine Minderung;
- Übertragung durch die verschiedenen Teile der Gebäudehülle;
- Schallausbreitung desjenigen Anteils, der die Gebäudehülle durchdrungen hat, im Freien.

Dieses Problem wird im Dokument **A6 „Akustik in der Industrie“** behandelt werden.

This type of study embraces the following range of problems:

- propagation of a noise in a building and its reduction;
- transmission through the elements of the building envelope;
- propagation in the open of the noise that has transmitted through the building envelope.

This is going to be treated in the document **A6 “Industrial acoustics”**.

Haftungsablehnung	**Disclaimer**
Wir erachten die in diesem Dokument gegebene Information als eine gute Praxis- und Branchenanleitung (**Anleitung**). Diese Richtlinie wurde von einer FESI (www.fesi.eu) Kommission erstellt und ist zum Zeitpunkt der Veröffentlichung korrekt. Obwohl wir zuversichtlich sind, dass die enthaltenen Informationen dem neuesten Stand entsprechen und genau sind, ist dies nur ein Bezugsdokument. Es liegt in der Verantwortung des Nutzers, sein eigenes Wissen um die in dieser Richtlinie angesprochenen Probleme auf dem neuesten Stand zu halten.	The information contained in this document is considered by us to be good practice and industry guidance (**Guidance**). The Guidance is provided by a commission of FESI (www.fesi.eu), and is considered to be correct at the date of publication. Whilst we are confident the information contained within it is up to date and accurate, it is a reference document only. It is your responsibility to ensure your knowledge of the matters discussed in the Guidance is kept up to date.
Diese Richtlinie soll allgemeinen Zwecken dienen, und ist nicht dazu gedacht, maßgebliche nationale oder internationale Normen, Richtlinien oder (wo zutreffend) gesetzliche Regelungen zu übersteuern. Diese Richtlinie soll keine detaillierten Berechnungen und Einschätzungen vorherrschender physikalischer Bedingungen bei komplexen Bauvorhaben ersetzen.	The Guidance is intended to be used for general purposes only and is not intended to take precedence over appropriate national and international standards, guidelines or laws (where applicable). The Guidance is not intended to replace detailed calculations and assessments of prevailing physical conditions in complicated building assignments.
Diese Richtlinie stellt keine gewerbliche Anweisung dar, und spezielle Fachfragen sollten anerkannten Experten vorgelegt werden. Jedes sich Verlassen auf diese Richtlinie ohne Einholung solchen Rates geschieht absolut auf eigene Gefahr. Wir geben keine irgendwie gearteten Zusicherungen oder Gewährlei= stungen, ausdrücklich oder dem Sinne nach, bezüglich der Vollständigkeit, Genauigkeit, Verlässlichkeit oder Maßgeblichkeit dieser Richtlinie.	The Guidance does not constitute professional advice and specific queries should be referred to qualified professionals. Any reliance placed on the Guidance without seeking such advice is strictly at your own risk. We make no representations or warranties of any kind, express or implied, about the completeness, accuracy, reliability or suitability of the Guidance.
Die Richtlinie wurde ursprünglich in Englisch verfasst. Wir übernehmen keine Verantwortung für irgendwelche Ungenauigkeiten, die in Übersetzungen dieser Richtlinie in andere Sprachen als Englisch enthalten sind.	The Guidance in its original form is written in English. We accept no responsibility for any inaccuracies contained in any translation of the Guidance in languages other than English.
Die Richtlinie wird kostenlos zur Verfügung gestellt und wir sind daher unter keinen Umständen haftbar für Verluste oder Schäden, einschließlich – ohne jede Einschränkung – indirekter oder Folgeverluste oder –schäden, oder sonstiger Verluste oder Schäden, die aus einem sich Verlassen auf diese Richtlinie herrühren.	The Guidance is provided free of charge and as such in no event will we be liable for any loss or damage including, without limitation, indirect or consequential loss or damage, or any loss or damage whatsoever arising from any reliance placed on the Guidance.
Keiner dieser Ausschlüsse oder Beschränkungen zielt jedoch darauf ab, irgendwelche Rechte, die nicht abbedungen werden können, zu begrenzen, oder Haftbarkeiten für Tod oder Personenschäden für Sie auszuschließen oder zu begrenzen, die aus unserer mangelnden Sorgfalt oder anderen Haftungsgründen herrühren, die wir aus gesetzlichen Gründen weder abbedingen noch begrenzen können	None of these exclusions or limitations, however, are intended to limit any rights which may not be excluded, nor to exclude or limit liability to you for death or personal injury resulting from our negligence or for other liability which we cannot exclude or limit by law.