Dr. Dr. Reinhard O. Neubauer, M.Sc.

Hochschule Augsburg University of Applied Sciences

Fakultät für Architektur und Bauingenieurwesen

Skriptum zur Vorlesung

Schallschutz (Bauakustik)

im Bachelorstudiengang

INHALTSVERZEICHNIS

Schallschutz (Bauakustik)

Der Schallschutz umfasst die Maßnahmen gegen die Schallentstehung (Primär-Maßnahmen) sowie die Maßnahmen, welche die Schallübertragung von einer Schallquelle zum Hörer verringern (Sekundär-Maßnahmen). Bei den Sekundär-Maßnahmen wird unterschieden, ob sich die Schallquellen und der Hörer im gleichen oder in verschiedenen Räumen befinden. Im ersten Fall erfolgt der Schallschutz durch die Schallabsorption und Schallabschirmung, im zweiten durch die Schalldämmung. Der Schallschutz im Gebäude, welcher sich auf den Schallschutz von Räumen bezieht, wird unter Bauphysikern als Bauakustik verstanden und der Schallschutz außerhalb von Gebäuden wird allgemein als Schallimmissionsschutz bezeichnet.
In der Bauakustik untersucht man die Schallausbreitung zwischen den Räumen innerhalb eines Gebäudes, beziehungsweise vom Freien ins Rauminnere. Die Übertragung des Schalls erfolgt durch Abstrahlung von Luftschall von den zu Schwingungen angeregten Gebäudestrukturen. Auf der Anregungsseite unterscheidet man zwischen der Luftschallanregung, bei der Luftschall die begrenzenden Flächen des Raumes in Schwingungen versetzt, und Körperschallanregung (z.B. Gehen, Stühlerücken oder Wasserleitungen in Wänden, Aufzüge etc.) bei der der Schall direkt in die Gebäudestruktur eingeleitet wird.
Wir konzentrieren uns hier auf die Grundlagen des Luft- und Trittschallschutzes und setzen den Schwerpunkt auf die Bauakustik.

1 Allgemeine Begriffe und Kenngrößen

Im Folgenden werden einige Begriffe der Bauakustik erläutert und wiedergegeben, um den späteren Ausführungen besser folgen zu können. Die Angaben erfolgen alphabetisch und haben keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Sie können, falls notwendig, ergänzt werden.

1.1 Begriffe

Absorptionsgrad
Der „Absorptionsgrad“ wird in der Akustik als Schallabsorptionsgrad mit dem Formelzeichen „α“ angegeben und ist als Verhältnis von absorbierter zu auffallender Schallenergie definiert. Der Schallabsorptionsgrad ist im Allgemeinen frequenz- und richtungsabhängig. Bei vollständiger Reflexion ist α = 0, bei vollständiger Absorption ist α = 1. Der Schallabsorptionsgrad hat keine Einheit [-].

Abstrahlgrad / Abstrahlmaß
Der Abstrahlgrad wird mit dem Formelzeichen „σ“ angegeben und beschreibt das Verhältnis der abgestrahlten Schall-Leistung P und der hypothetischen Schall-Leistung, die von einer konphas mit der effektiven Schnelle $\tilde{v}_n$ schwingenden Oberfläche S in die umgebende Luft abgestrahlt werden würde. Der Abstrahlgrad hat keine Einheit [-]. Die abgestrahlte Schall-Leistung ist eine komplexe Größe. Der Imaginärteil der abgestrahlten Schall-Leistung entspricht das ins Nahfeld abgestrahlte Schall-Leistung. Das Nahfeld klingt mit zunehmendem Abstand zur Quelle ab, sodass der Imaginärteil der Schall-Leistung abhängig vom Abstand zur Quelle ist. Der Realteil hingegen ist nicht abhängig vom Abstand zur Quelle und damit eine konstante, strahlerspezifische Größe und entspricht der ins Fernfeld abgestrahlten Schall-Leistung, die auch der Schall-Leistung entspricht, die messtechnisch bestimmt wird.
Das Abstrahlmaß (L_σ) ist der zehnfache dekadische Logarithmus des Abstrahlgrades. Das Abstrahlmaß hat die Einheit [dB].

A-Bewertung

Der Schalldruckpegel ist eine rein physikalische Größe; er ist von der frequenzabhängigen Empfindlichkeit des menschlichen Ohres unabhängig. Der Zusatz „A" zum Schallpegel in dB bedeutet, dass das Geräusch entsprechend der international festgelegten „IEC-Bewertung A" bewertet ist. Diese Bewertung berücksichtigt die frequenzabhängige Sensibilität des menschlichen Gehörs. Da unser Gehör Töne unterschiedlicher Frequenz als verschieden laut empfindet, werden die Schallsignale im Schalldruck-Messgerät so gefiltert, dass die Eigenschaften des menschlichen Gehörs nachgeahmt werden. Man spricht dann von einer sogenannten A-Bewertung des Schallpegels (frühere Bezeichnung: dB(A)). Die Dezibel-Skala ist logarithmisch aufgebaut. 0 dBA entspricht der Hörschwelle. 130 dBA ist etwa die Schmerzgrenze. Schallpegelmesser messen den Schalldruckpegel im Allgemeinen in dBSPL (SPL = Sound Pressure Level), also unbewertet.

Äquivalente Schallabsorptionsfläche

In der Akustik beschreibt man das Produkt aus Fläche (S) und Absorptionsgrad (α) als äquivalente Schallabsorptionsfläche „A", ihre Einheit ist [m²]. Die äquivalente Schallabsorptionsfläche A ist diejenige fiktive geometrische Fläche mit hundertprozentiger Absorption, welche in einem diffusen Schallfeld den gleichen Abklingvorgang liefert wie die tatsächlich vorliegende Raumoberfläche mit den tatsächlich vorliegenden Absorptionsgraden. Die äquivalente Schallabsorptionsfläche wird häufig verkürzt als Absorptionsfläche bezeichnet.

Biegewelle

Biegewellen sind gemischt longitudinale und transversale Wellen. Sie sind für die Bauakustik relativ wichtig, weil sie leicht in Platten (z.B. Decken, Wände) entstehen können und durch die transversale Auslenkung ihrer Oberfläche in der Lage sind, in die umgebende Luft Schall abzustrahlen. Ein Charakteristikum der Biegewelle ist, dass sie „dispersiv" ist, d. h. eine frequenzabhängige Ausbreitungsgeschwindigkeit besitzt. Alle anderen Wellenarten besitzen eine konstante Ausbreitungsgeschwindigkeit.

Dezibel

Das Dezibel ist das in der Akustik verwendete Maß zur Angabe des Schallpegels eines Geräusches oder eines Tones durch einen Einzahlwert. Das Dezibel ist abgeleitet vom Verhältnis zweier Größen und ist daher ohne Dimension. Das Bel ist streng genommen also keine Einheit im Sinne des SI-Einheitensystems, sondern eine „Quasieinheit" wie das Prozentzeichen (%). Allgemein wird der Schallpegel in Zehntel-Bel, den Dezibel (dB), angegeben. Das Dezibel ist benannt nach dem Physiologen Alexander Graham Bell (1847–1922).

Diffusor

Ein Diffusor ist eine Konstruktion oder Material, dass die Schallwellen, die auf seine Oberfläche auftreffen möglichst gleichmäßig im Raum zerstreuen (reflektieren). Die modernen Diffusoren werden gewöhnlich aus Holz oder einem anderen schallharten Material hergestellt.

Frequenz

Die Akustik unterscheidet zwischen Tönen, Klängen und Geräuschen. Bei einer sinusförmigen Schwingung entsteht ein Ton, mehrere harmonische Schwingungen ergeben zusammen einen Klang und viele verschiedene Töne ohne gesetzmäßigen Zusammenhang bezeichnet man als Geräusch. Bei einem Ton verläuft die Schwingung in Abhängigkeit von der Zeit gleichmäßig. Die Anzahl der Schwingungen pro Sekunde wird als Frequenz (f) bezeichnet, ihre Einheit ist das Hertz (1 Hz = 1/s). 100 Hz bedeuten somit 100 Schwingungen je

Sekunde. Mit zunehmender Frequenz nimmt auch die Tonhöhe zu. Helle Geräusche (z.B. Quietschen) haben deshalb eine hohe Frequenz, tiefe Geräusche (z.B. Brummen) sind niederfrequent. Der Hörfrequenzbereich des Menschen liegt im Bereich von etwa 16 Hz bis 20.000 Hz.

Frequenzbereich

Für den allgemeinen Schallschutz in der Bauakustik ist zur normgemäßen Beurteilung der sogenannte "bauakustisch relevante Frequenzbereich" maßgebend. Dieser Tonhöhenbereich umfasst den Bereich von 100 Hz bis 3.150 Hz, aufgeteilt in 16 Terzbänder (1 Terzband = 1/3 Oktavband).

Geräusch

Geräusche enthalten viele verschiedene Frequenzen ohne bestimmtes Frequenzverhältnis. Dominierende Frequenzen machen den Charakter eines Geräusches aus. Geräusche haben ein aperiodisches Wellenmuster, also keine eindeutige Wellenlänge, nicht ganzzahlige Verhältnisse der Teiltöne zueinander (1:1,1:1,2:1,3 ..., man spricht von einem unharmonischen Teiltonkontinuum) und ein fast lückenloses Obertonspektrum.

Impedanz (Schallkennimpedanz)

Die Schallkennimpedanz definiert das Verhältnis von Schalldruck p zu Schallschnelle v. Schalldruck und Schallschnelle werden allgemein als komplexe Größen beschrieben, die jeweils von der Frequenz abhängen. Im Fernfeld sind Druck und Schnelle in Phase, deshalb berechnet sich die Schallkennimpedanz reellwertig. Das Produkt aus Dichte ρ und Schallgeschwindigkeit c_0 ist gleich der Schallkennimpedanz Z und damit in einem homogenen, invarianten Schallfeld räumlich und zeitlich konstant. Dieser Zusammenhang wird als akustische Äquivalenz auch als „Ohm'sches Gesetz der Akustik" genannt. Die Schallkennimpedanz hat die Einheit [Ns/m³]. Der Schalldruck entspricht der elektrischen Spannung und die Schallschnelle der Stromstärke. Für Luft bei 20°C beträgt die Schallkennimpedanz Z_0 = 413 Ns/m³.

Körperschall

Mechanische Wellen, die sich in festen Körpern ausbreiten, werden Körperschall genannt. In der Bauakustik wird der Körperschall, der auf einem Fußboden durch Stühlerücken oder Schritte etc. entsteht, Trittschall genannt. Körperschall kann vom Ohr nicht wahrgenommen werden. Die Wahrnehmung von Körperschall erfolgt durch das Ohr erst, wenn er als Luftschall vom jeweiligen Bauteil (fester Körper) abgestrahlt wird.

Lautstärke

Die wahrgenommene Lautstärke ist eine psychoakustische Größe, die vom Schalldruckpegel, vom Frequenzspektrum und dem Zeitverhalten des Schalls abhängig ist. Die Lautstärkenempfindung ist von der Schwingungsform abhängig und kann bei kleinerer Amplitude sogar größer sein. Die Schulregel „je größer die Amplitude, umso lauter der Ton" ist falsch! Allgemein gilt: Wenn die Frequenz und die Schwingungsform gleich sind, dann ist die Lautstärkenempfindung proportional zur Amplitude. Die Lautstärke wird gemessen in Phon. Das ist ohrgemäß bzw. hörgerecht bewerteter Schalldruckpegel. Um subjektive Faktoren bei der Beurteilung der „Lautstärke" wenigstens im einfachsten Fall genauer beschreiben zu können, ist in der Audiometrie die Bestimmung von „Kurven gleicher Lautstärkenempfindung" für Sinustöne eingeführt worden. Hier wird bestimmt, bei welcher Schallintensität oder welcher Dezibel-Größe zwei (Sinus-)Töne unterschiedlicher Tonhöhe als gleich laut empfunden werden. Die Kurven gleicher Lautstärkenempfindung haben zur Definition der

Maßeinheit Phon geführt. Bei 1.000 Hertz haben definitionsgemäß Schalldruckpegel in dB und Lautstärkepegel in Phon übereinstimmende Zahlenwerte.

Lautheit

Die Lautheit ist ein Begriff aus der Psychoakustik und hat die Einheit Sone. Die Lautheit 1 Sone und die Lautstärke 40 Phon stimmen definitionsgemäß bei 1.000 Hz überein. Wegen der linearen Teilung der Sone-Skala steigen deren Werte wesentlich schneller an als die Werte der logarithmischen Phon-Skala. Einer Verdoppelung der Lautheit in Sone entspricht eine Vergrößerung der Phon-Zahl um je 10 Phon. Dieser Zusammenhang entspricht dem Stevens‘schen Potenzgesetz, gilt jedoch nur für mittlere und hohe Lautstärken ab 40 Phon. Das Sone ist keine SI-Einheit.

Luftschall

Luftschall ist ein Schallereignis in der Luft. Bei der Entstehung von Luftschall wird zwischen der direkten und der indirekten Schallentstehung unterschieden. Bei der direkten Schallentstehung werden die Luftteilchen durch Strömungsvorgänge unmittelbar zu Schwingungen, d. h. zu Luftschall, angeregt. Als indirekte Schallentstehung bezeichnet man dagegen den Mechanismus, bei dem, ausgehend von Erregerkräften, in einer mechanischen Struktur höherfrequente Schwingungen eingeleitet werden. Ein Teil der so induzierten Körperschall-Schwingungsenergie wird in Wärme umgewandelt, ein anderer Teil an der Strukturoberfläche auf die angrenzende Luft übertragen. Diese Energieübertragung bezeichnet man als Schallabstrahlung. Luftschallwellen sind immer Longitudinalwellen.

Nachhallzeit

Die Nachhallzeit „*T*“ ist die Zeit, die nach Abschalten einer Schallquelle in einem Raum vergeht, bis die mittlere, eingeschwungene Schallenergiedichte auf 1/1.000.000 des Anfangswertes oder der Schalldruck auf 1/1.000, d. h. um 60 dB, abgeklungen ist. Historisch gesehen beschreibt die Nachhallzeit, wie lange ein Geräusch braucht, um unhörbar zu werden. Die Nachhallzeit ist mathematisch mit der äquivalenten Schallabsorptionsfläche *A* des Raumes verknüpft. Deshalb ist die Nachhallzeit die maßgebliche raumakustische Planungsgröße. Das Formelzeichen der Nachhallzeit ist „*T*“ und ihre Einheit ist die Sekunde [s].

Periodendauer

Die Periodendauer ist die Zeit zwischen zwei aufeinanderfolgenden Wellenmaxima, bzw. die Zeit die vergeht, bis sich die Form der Welle wiederholt. Das Formelzeichen der Periodendauer einer Schwingung ist „*T*“ und ihre Einheit ist die Sekunde [s].

Rauschen

Als Rauschen bezeichnet man in der Akustik ein Schallereignis, das sich aus mehreren hörbaren Frequenzen zusammensetzt. In der Signalverarbeitung beschreibt man Rauschen als stochastisches Signal. Für die Ermittlung der Schalldämmung wird als Signal weißes und rosa Rauschen verwendet. Weißes Rauschen setzt sich aus allen Frequenzen des hörbaren Bereichs, also von etwa 16 Hz bis 20 kHz zusammen. In ihm sind alle Frequenzen mit gleicher Amplitude, d.h. dem gleichen Lautstärkepegel enthalten. Beim Rosa Rauschen (Synonym: 1/f-Rauschen) sind die Lautstärkepegel der verschiedenen Frequenzen der Empfindlichkeit des Gehörs angepasst. Die Amplitude nimmt pro Oktave um 3 dB ab. Dadurch ergibt sich eine logarithmisch absteigende Frequenzverteilung, bei der die niederfrequenten Töne stärker betont sind als die hochfrequenten.

Reflexion

Werden Schallwellen durch irgendwelche Hindernisse an einer freien Ausbreitung gestört, so beobachtet man Beugung und Streuung, wenn die Schallwellenlänge groß bzw. vergleichbar ist mit den Abmessungen der Hindernisse. Ist sie dagegen klein, so werden die Schallwellen reflektiert und gebrochen. Die Schallreflexion ist mit der Reflexion in der Optik vergleichbar, wenn die Abmessungen des Reflektors mindestens die fünffache Wellenlänge haben. Der einfachste Fall ist eine Reflexion an einer ebenen Fläche. Hierfür gilt die Regel: Einfallswinkel gleich Reflexionswinkel, auch für gekrümmte Flächen. Als Reflexionsfläche legt man die Tangente durch den Reflexionspunkt. An der Reflexionsfläche kann sich die Schallquelle spiegeln und auf der anderen Seite der Fläche abbilden. Diese neue Schallquelle wird als Spiegelschallquelle bezeichnet.

Schall

Unter Schall versteht man mechanische Schwingungen und Wellen eines elastischen Mediums, insbesondere im Frequenzbereich des menschlichen Hörens von etwa 16 Hz bis 20.000 Hz. Pflanzen sich die Schwingungen in Luft fort, spricht man von Luftschall. Bei Schwingungen in festen Körpern, z.B. im Mauerwerk, spricht man von Körperschall. Schall ist eine longitudinale mechanische Welle, bei der sich zeitlich periodisch der Druck ändert. Schall breitet sich in einem Stoff mit einer bestimmten Geschwindigkeit, der Schallgeschwindigkeit, aus. Da Schall eine mechanische Welle ist, treten bei Schallwellen auch Beugung und Interferenz auf. Trifft Schall auf eine Fläche, so wird er reflektiert. Die Reflexion ist umso stärker, je glatter die Oberfläche ist. Für die Reflexion von Schall gilt das Reflexionsgesetz: *Einfallswinkel und Reflexionswinkel sind gleich groß*.

Schalldruck

Der Schalldruck p ist der Wechseldruck, der dem statischen Luftdruck p_0 überlagert ist. Der wahrgenommene (empfundene) Schall, der Schalldruck, besteht also aus periodischen Druckschwankungen um einen stationären Mittelwert, dem atmosphärischen Gleichdruck von 101.325 Pascal (Standardatmosphäre des Luftdrucks auf Meereshöhe: 1.013,25 hPa), dem der hörbare Schall überlagert ist. Dieser Wechseldruck (Druckschwankung) kann mit Hilfe von Mikrofonen gemessen werden. Da sich übliche Schalldrücke bis zu 6 Zehnerpotenzen unterscheiden können, wird aus Zweckmäßigkeitsgründen ein logarithmisches Maß verwendet. Die Einheit des Schallpegels „L“ ist [dB]. Ist nichts Genaueres definiert, wird unter Schallpegel gewöhnlich der Schalldruckpegel L_p verstanden. Der Bezugsschalldruck ist der gerade noch hörbare Wechseldruck (Hörschwelle) und beträgt 20 μPa bzw. $2 \cdot 10^{-5}$ Pa.

Schallgeschwindigkeit

Wie schnell sich der Schall im jeweiligen Medium ausbreitet, besagt die Schallgeschwindigkeit c in ms^{-1}. Sie ist temperaturabhängig und beträgt zum Beispiel bei 20 °C, 343 Meter pro Sekunde. Wenn sich die Entfernung verdoppelt, nimmt bei ungehinderter Ausbreitung der von einer punktförmigen Schallquelle (zum Beispiel Maschine) ausgehende Schall um etwa sechs dB und der von einer linienförmigen Schallquelle (zum Beispiel Straße) ausgehende Schall um etwa drei dB ab. Die Ausbreitung wird durch Schallbrechung, Schallbeugung, Schallreflexion, Schallinterferenz und Schallabsorption witterungsabhängig beeinflusst. In Extremfällen können an gleichen Orten witterungsbedingt deutliche Pegelschwankungen auftreten.

Schall-Leistung / Schall-Leistungspegel

Die Schall-Leistung „P“ ist eine entfernungs- und raumunabhängige Größe, die sich als Ausgangspunkt für alle schalltechnischen Berechnungen eignet. Sie ist nicht direkt messbar, sondern nur über bestimmte

Messverfahren zu ermitteln. Die Schall-Leistung beschreibt die gesamte wirkliche Schallenergie, die von einer Schallquelle abgegeben wird. Sie bezeichnet die pro Zeitspanne von einer Schallquelle abgegebene Schallenergie. Sie ist eine der Schallenergiegrößen und ist eine mechanische Leistung. Ihre Einheit ist Watt (W).
Der Schall-Leistungspegel „L_w“ ist für eine Schallquelle die kennzeichnende schalltechnische Größe. Im Gegensatz zum Schalldruckpegel „L_p“ ist der Schall-Leistungspegel L_w vollkommen unabhängig vom Schallfeld, also von der Größe und Form des Raumes und der Entfernung zur Quelle.
Wird aus der Schall-Leistung ein Pegel berechnet beträgt die Bezugsschall-Leistung P_0 = 1x10^{-12} W.

Schalldämmung

Die Schalldämmung ist die Grundlage der Bauakustik. Sie bezeichnet die Behinderung der Ausbreitung von Luft- oder Körperschall in angrenzende Räume durch Reflexion des sich ausbreitenden Schalls an einzelnen Unstetigkeitsstellen und wird gekennzeichnet durch das Schalldämm-Maß „*R*“ in dB. Die Schalldämmung ist damit eine Maßnahme zur akustischen Trennung von unterschiedlichen Räumen. Der Schallreflexionsfaktor r wird angegeben als Quotient aus dem Schalldruck p_r einer reflektierten Schallwelle und dem Schalldruck p_e der einfallenden Welle. Je größer der Reflexionsfaktor, desto stärker die schalldämmende Wirkung. Dies wird in der Praxis erreicht durch einen möglichst großen Impedanzsprung an der reflektierenden Grenzfläche (z.B. Trennwand). Die Schalldämmung einschaliger Bauteile hängt überwiegend von der vorhandenen flächenbezogenen Masse ab. Bei mehrschaligen Bauteilen spielt die Art der Ausführung eine zusätzliche Rolle. Wesentliche Einflussgrößen sind Abstände, Massen und Kopplung der beiden Schalen sowie die Dämpfung im Zwischenraum.

Schallschatten

Ein Schallschatten entsteht, wenn sich auf dem direkten Schallweg von der Schallquelle zum Hörer oder zum Mikrofon Hindernisse z. B. Schallschirme oder auch Lärmschutzwände, befinden. Die entstehende Abschattung ist ein Gebiet verminderten Schalldrucks oder Schalldruckpegels auf der schallquellen-abgewandten Seite eines Hindernisses und ist kein scharfer Schatten, sondern, wie bei der Beugung von Licht, eine breite Zone mit mehr oder weniger ausgeprägten Klangverfärbungen. Der Schallschatten wird durch die Wirkung der Schallbeugung „aufgehellt“, d. h. die Schallgrenze – oder Schattengrenze – ist mehr oder weniger verwaschen. Alle Schallanteile, deren Wellenlänge größer als die Ausdehnung der Hindernisse sind, werden um das Hindernis herum gebeugt. Ist die Wellenlänge λ klein verglichen mit der Ausdehnung des Hindernisses d, so entsteht dahinter ein Schallschatten, wobei die Übergänge gleitend sind. Damit ergibt sich als Wirkung eines Hindernisses im Schallfeld eine „Verdumpfung“ des Klangbilds, und zwar umso stärker, je größer das Hindernis ist. Erst wenn die Ausdehnung des Hindernisses d größer als das Fünffache seiner Wellenlänge λ ist, entsteht für diese Frequenz f und höhere Frequenzen ein hörbarer verdumpfender Schallschatten. Der Raum hinter dem Ausbreitungshindernis ist der Schattenraum.

Schallschirm

Ein Schallschirm stellt ein Hindernis dar, das die direkte Ausbreitung des Schalls von einer Quelle zu einem Empfänger unterbricht. Dies kann eine Stellwand oder ein Aufsatz auf einem Schreibtisch sein. Auch Schränke und andere großflächige Einrichtungselemente können die Funktion eines Schallschirms übernehmen. Schallschirme können mit einer schallabsorbierenden Oberfläche ausgestattet sein, die die Schallausbreitung zusätzlich reduziert. Durch die Unterbrechung der direkten Ausbreitung des Schalls wird durch diese „Schallschirme“ der Schalldruck reduziert.

Schwingungen

Bei einer Schwingung wechselt die Energie zeitlich periodisch zwischen zwei verschiedenen Energieformen (potenzielle und kinetische Energie). Zu unterscheiden sind freie und erzwungene Schwingungen. Letztere werden durch eine periodische äußere Kraft zum Schwingen gebracht, während bei ersteren nur innere Kräfte wirken. Bei Anwesenheit dissipativer Prozesse (z.B. Reibung) spricht man von gedämpften Schwingungen. Unter harmonischen Schwingungen versteht man Schwingungen mit einem sinusförmigen Schwingungsverlauf. Voraussetzung dafür ist eine der Auslenkung proportionale rückstellende Kraft. Bei gekoppelten Systemen führt dies zu einem linearen Differentialgleichungssystem – es handelt sich also um lineare Schwingungen. Nicht alle linearen Schwingungen sind auch harmonisch, etwa bei linearer Dämpfung. Die meisten Schwingungen sind anharmonisch und ihr Verlauf ist häufig eine sehr komplizierte periodische Funktion der Zeit. Ein Beispiel für anharmonische Schwingungen sind Töne, die erst durch die charakteristische Verteilung der Obertöne ihre typische Klangfarbe erhalten. Jede Schwingung kann in eine harmonische Grundschwingung und eine im Allgemeinen große Anzahl von harmonischen Oberschwingungen zerlegt werden, deren Frequenzen ganzzahlige Vielfache der Grundfrequenz sind (Fourier-Reihe / Fourier-Analyse). Breitet sich eine Schwingung im Raum aus, so spricht man von Wellen.

Spuranpassung

Als Spuranpassung wird der Sachverhalt genannt, wenn zwei Frequenzen zusammenfallen, dann spricht man auch von Koinzidenz. Die Koinzidenzfrequenz beschreibt die tiefste Frequenz, bei der die sogenannte Spuranpassung eintritt. Sie wird auch Koinzidenzgrenzfrequenz oder einfach Grenzfrequenz genannt. Sie tritt auf. wenn Schall schräg auf eine Platte trifft, dann wird diese unter anderem zu Biegewellen mit gleicher Frequenz, Phase und Kraft angeregt. Die Wellenlänge dieser erzwungenen Biegewelle entspricht der Spurwellenlänge der einfallenden Luftschallwelle. Je nach Plattenmaterial und Abmessungen besitzt diese „freie Biegewellen“. Diese lassen sich leicht anregen. Ihre Wellenlänge ist bei gleicher Frequenz eine andere als die der erzwungenen Biegewellen. Wenn nun die Wellenlängen der erzwungenen und freien Biegewellen übereinstimmen, kommt es zu einer resonanzartigen Erhöhung der Amplitude der Wandschwingung und somit zu einer Verminderung der Schalldämmung.

Trittschall

Der Trittschall wird dem Körperschall bauphysikalisch zugeordnet. Körperschall bezeichnet die mechanischen Schwingungen, die sich in festen Stoffen ausbreiten. Eine spezielle Art von Körperschall ist der sogenannte Trittschall. Körperschall kann vom Ohr nicht wahrgenommen werden. Er wird jedoch durch Abstrahlung von Wänden, Böden und anderen Oberflächen in Luftschall umgewandelt, den das Ohr wahrnimmt. Die Oberfläche verhält sich wie die bewegliche Membran eines Lautsprechers und versetzt dadurch die Luft in Schwingung. Beispiele für Körperschall sind: Hämmern, Fallenlassen von Gegenständen, Begehen des Bodens oder einer Treppe (was in der Bauakustik als Trittschall bezeichnet wird). Trittschall ist also der Körperschall, der beim Begehen oder bei ähnlicher Anregung einer Decke entsteht und teilweise als Luftschall in einen angrenzenden Raum weitergeleitet und dort abgestrahlt wird.

Trittschalldämmung

Die Trittschalldämmung charakterisiert das Verhalten von Decken beim Durchgang von Trittschallwellen. Eine Decke, die dem Durchgang von Trittschallwellen einen hohen Widerstand entgegensetzt, besitzt eine gute Trittschalldämmung. Die Trittschalldämmung wird durch den Trittschallpegel ausgedrückt. Der Trittschallpegel ist ein Maß für das zu erwartende Störgeräusch, das von Tritten, Stühlerücken, Hüpfen etc. an der Decke ausgeht. Ein hoher Trittschallpegel ist ein Beleg für eine mangelhafte Trittschalldämmung. Der bewertete Norm-Trittschallpegel ($L_{n,w}$) wurde eingeführt, um mit einer Zahl den Trittschallschutz einer Deckenkonstruktion ausdrücken zu können. Dieser „Einzahlwert“ kann dann mit einem Anforderungswert verglichen werden.

Wellen

Eine Welle ist eine sich räumlich ausbreitende Erregung, die Energie, jedoch keine Materie transportiert. Damit können Wellen als Ausbreitung der Störungen von physikalischen Größen, wie z.B. die Auslenkung von Teilchen eines Mediums oder die Feldgrößen eines physikalischen Feldes, aufgefasst werden. Die Störung kann dabei eine einmalige Erregung oder auch ein periodischer Vorgang sein. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Wellen ist stets endlich. Die Wellenausbreitung innerhalb eines Mediums erfolgt durch die Anregung von Teilchen zu Schwingungen auf Grund bereits schwingender Teilchen. Man spricht von Longitudinalwellen oder auch Längswellen, wenn diese Schwingungen in Ausbreitungsrichtung der Welle erfolgen. Bei Schwingungen senkrecht zur Ausbreitungsrichtung spricht man von Transversalwellen oder Längswellen. Wasserwellen sind ein Beispiel für Transversalwellen, Schallwellen sind Longitudinalwellen. Als charakteristische Größen zur Beschreibung einer Welle dienen die Wellenlänge λ und die Frequenz f sowie die Schwingungsdauer T. Beim Übergang von einem Medium in ein anderes bleibt die Frequenz f unverändert. Dies gilt jedoch nicht für die Wellenamplitude, die insbesondere beim Schallübergang von einem gasförmigen Medium in ein festes Medium sehr stark abfällt. Dies hat zur Folge, dass Luftschall kaum in Flüssigkeiten oder Fest-Körper eindringt. Aus dem gleichen Grund wird die Körperschall-Leitung in Mauerwerk oder Metall durch Einlegen von weichen Schichten (Kork, Gummi, Dämmstoffe) unterbrochen.

Harmonische Wellen (also Sinuswellen) sind monochromatisch, d.h. es existiert nur eine einzige Schwingungsfrequenz. Sind die Wellen periodisch, aber nicht harmonisch, so kann ihre Amplitude dargestellt werden als Überlagerung aus harmonischen Wellen verschiedener diskreter Frequenzen. Im Allgemeinen muss eine Welle auch nicht periodisch sein. Eine derartige Erregung lässt sich in ein kontinuierliches Spektrum aus harmonischen Wellen mit verschiedener Amplitude zerlegen (Fourier-Zerlegung):

- Harmonische Wellen sind monochromatisch
    - Harmonische Schallwellen transportieren Töne
- Periodische Wellen besitzen ein diskretes Frequenzspektrum
    - Periodische Schallwellen transportieren Klänge
- Nichtperiodische Wellen besitzen ein kontinuierliches Frequenzspektrum
    - Anharmonische Schallwellen transportieren Geräusche

Wellenlänge

Schall ist eine lokale Änderung der Luftdichte bzw. des Luftdrucks die sich dem atmosphärischen Luftdruck überlagert. Der zu einem festen Zeitpunkt in Ausbreitungsrichtung gemessene Abstand zweier Wellenflächen gleicher Phase bezeichnet man als Wellenlänge. Die Wellenlänge λ beschreibt die Periodizität der Wellenausbreitung im Raum.

1.2 Kenngrößen

Ein angenehmes Wohn- und Arbeitsumfeld setzt einen ausreichenden baulichen Schallschutz voraus. Ziel der Bauakustik ist es daher, die Luft- und Trittschallübertragung in Gebäuden zu vermindern, um Störungen durch Innen- und Außenlärm so weit wie möglich zu vermeiden. In der Bauakustik existieren eine Vielzahl von Kenngrößen, die für sich gesehen alle ihre eigene Bedeutung in der bauakustischen Planung eines Raumes bzw. eines Gebäudes haben. Zur Behandlung von Räumen des Alltags, wie z.B. Wohnungen, Hotelzimmer, Klassenräume, Büros, etc., werden nur diejenigen Kenngrößen vertieft, die sich als „regelwerksrelevant“ erweisen. Diese beziehen sich im Allgemeinen auf die Anforderungen aus den anzuwendenden Regelwerken wie DIN-Normen oder gesetzliche Regeln. Die bauakustischen Verhältnisse ergeben sich aus dem Raumvolumen, der flächenbezogenen Masse des Bauteils, sowie der Größe des Trennbauteils. Das Volumen, die Raumform und das verwendete Material unterliegen weiteren gestalterisch-architektonischen Einflüssen, die sich auch aus der Nutzung bzw. aus dem bestimmungsgemäßen Gebrauch ergeben. Prinzipiell unterscheidet man zwischen äußerem und innerem Schallschutz. Der äußere Schallschutz bezieht sich dabei auf den von außen auf ein Gebäude einwirkenden Schall z.B. durch Verkehrslärm und der innere Schallschutz bezieht sich auf den Schallschutz innerhalb eines Gebäudes bzw. zwischen zwei schutzbedürftigen Bereichen, wie sie z.B. zwischen zwei fremden Wohnungen vorliegen. Wichtige Kenngrößen sind:

Äquivalenter bewerteter Norm-Trittschallpegel, $L_{n,w,eq}$
Der äquivalente bewertete Norm-Trittschallpegel beschreibt den Norm-Trittschallpegel von Massivdecken ohne Flankenübertragung und ohne Deckenauflage oder Unterdecke. Der äquivalente bewertete Norm-Trittschallpegel dient als Eingangswert für die Prognose des bewerteten Norm-Trittschallpegels von Massivdecken mit Deckenauflagen und / oder Unterdecken $L_{n,w}$ und dient als Eingangsgröße zur Prognose des bewerteten Norm-Trittschallpegels im Bau $L'_{n,w}$ unter Berücksichtigung der Flankenübertragung.

Bewertetes Bau-Schalldämm-Maß, R'_w
Das bewertete Bau-Schalldämm-Maß R'_w ist definiert als mit Hilfe einer Bezugskurve ermittelte Einzahlangabe zur Kennzeichnung der Luftschalldämmung von Bauteilen, ausgehend von Spektren in Terzbändern, bei denen die Schallübertragung über das trennende und die flankierenden Bauteile sowie gegebenenfalls über Nebenwege ermittelt wird. Der Bezugspunkt der verschobenen Bezugskurve ist bei 500 Hz. Je größer dieser Einzahlwert ist, ausgedrückt in dB, desto besser ist der Luftschallschutz.

Bewertete Trittschallminderung, ΔL_w
Die bewertete Trittschallminderung ist eine Einzahlangabe zur Beschreibung der Verbesserung des äquivalenten bewerteten Norm-Trittschallpegels durch Deckenauflagen und / oder Unterdecken. Durch eine Addition des äquivalenten bewerteten Norm-Trittschallpegels mit der bewerteten Trittschallminderung erhält man den bewerteten Norm-Trittschallpegel $L_{n,w}$ der Decke alleine ohne Nebenwegübertragung über flankierende Bauteile.

Bewerteter Norm-Trittschallpegel, $L'_{n,w}$
Der bewertete Norm-Trittschallpegel, $L'_{n,w}$ ist definiert als mit Hilfe einer Bezugskurve ermittelte Einzahlangabe zur Kennzeichnung der Trittschalldämmung von Bauteilen, ausgehend von Spektren in Terzbändern, bei denen die Schallübertragung über das trennende und die flankierenden Bauteile sowie gegebenenfalls über Nebenwege ermittelt wird. Der Bezugspunkt der verschobenen Bezugskurve ist bei 500 Hz.
Je kleiner dieser Einzahlwert ist, ausgedrückt in dB, desto besser ist der Trittschallschutz.

Einfügungsdämpfungsmaß, D_e

Das Einfügungsdämpfungsmaß D_e beschreibt, um welchen Betrag der Schallleistungspegel an einer bestimmten Stelle im Kanal durch Einfügen des Schalldämpfers abnimmt.

Fugenschalldämm-Maß, R_{ST}

Das Fugenschalldämm-Maß ist vergleichbar einem Schalldämm-Maß, das eine Bauteilfläche besitzt, bei dem je m² Fläche eine 1 m lange Fuge vorhanden ist, wobei die Schallübertragung nur über die Fuge erfolgt.

Grundgeräuschpegel, L_B

Der Grundgeräuschpegel ist der geringste an einem Ort während eines bestimmten Zeitraumes gemessene A-bewertete Schalldruckpegel in dB, der durch entfernte Geräusche verursacht wird und bei dessen Einwirkung Ruhe empfunden wird. Er ist der niedrigste Wert, auf welchen die Anzeige des Schallpegelmessers (Anzeigedynamik „Fast") wiederholt zurückfällt. Er kann nur ermittelt werden, wenn benachbarte Betriebe oder andere Schallquellen, die an der Erzeugung von deutlich erkennbaren Schallereignissen beteiligt sind, abgeschaltet werden können. Wenn eine Schallpegelhäufigkeitsverteilung vorliegt, und über die gesamte Meßdauer keine gleichbleibenden Störgeräusche enthalten sind, kann der in 95 Prozent des Meßzeitraumes überschrittene Schalldruckpegel, also der Basispegel (L_{A95}), als Grundgeräuschpegel eingesetzt werden.

Installationsgeräuschpegel, $L_{,Ins}$

Geräuschquellen, die von Sanitärinstallationen ausgehen, können eine Körperschallanregung auslösen. Diese wird bei eingemauerten Leitungen, an Durchführungen und durch Befestigungen auf den Baukörper übertragen. Der in einen Raum abgestrahlte Luftschallpegel wird als Installationsgeräuschpegel bezeichnet und als A-bewerteter Schalldruckpegel in dB angegeben.

Nachhallzeit, *T*

Die Nachhallzeit ist die Zeit, die vergeht, bis der Schallpegel im Raum um 60 dB abgefallen ist.

Ruhepegel, L_G

Der Ruhepegel ist der Schalldruckpegel im Raum der vor und nach einer Schalldämmungsmessung gemessen wird. Der Ruhepegel wird benötigt um bewerten zu können, ob das zu messende Schallsignal (z.B. Trittschallpegel) einen ausreichenden Signal-Rausch-Abstand (SNR, engl. signal-to-noise-ratio) hat.

Resultierendes Gesamtschalldämm-Maß, $R'_{w,res}$

Das resultierende Gesamtschalldämm-Maß ist das Schalldämm-Maß, das sich entweder bei flächenzusammengesetzten Bauteilen über die Summe der einzelnen Schalldämm-Maße (flächengemitteltes Schalldämm-Maß) oder es ist das Schalldämm-Maß, das sich aus der Summe aller an der Schallübertragung (energetisch gemitteltes Schalldämm-Maß) beteiligten Bauteile ergibt.

Schall-Leistungspegel, L_W

Die Schallleistung ist definiert als die von einer Schallquelle abgegebene gesamte Leistung des Schalls, unabhängig von der Entfernung, vom Aufstellungsort und der Umgebung. Diese raum- und richtungsunab-hängige Leistung ist notwendig zur Erzeugung von Schalldruckwellen und resultiert z. B. aus der Integration der Schalldrücke über eine Hüllfläche um die Geräuschquelle. Der Schallleistungspegel ist nicht mit dem Schalldruckpegel zu verwechseln. Die dB-Werte beim Schalldruckpegel sind immer an die Entfernung (den Abstand) zur Schallquelle gebunden; dagegen haben die dB-Werte beim Schallleistungspegel keine Beziehung zum Abstand von der Schallquelle. Da die emittierte Schallleistung einer Schallquelle orts- und raumunabhängig ist, ist sie entsprechend für alle Entfernungen von der Schallquelle gleich.

Spektrum-Anpassungswert, *C*

Ein Spektrum-Anpassungswert ist nach DIN EN ISO 717-1 ein Wert, in Dezibel, der zur Einzahlangabe (z. B. R_w) zu addieren ist, um ein bestimmtes Schallspektrum zu berücksichtigen. Die Spektrum-Anpassungswerte können in verschiedenen Frequenzbereichen angewendet werden. Ohne gesonderte Angabe des Frequenzbereiches bezieht sich der Spektrum-Anpassungswert auf 100 Hz – 3.150 Hz. Mit Angabe des Frequenzbereichs wird er mit einem Index bei 100 Hz – 5.000 Hz, 50 Hz – 3.150 Hz oder 50 Hz – 5.000 Hz verwendet.
Der Spektrum-Anpassungswert *C* steht im Wesentlichen für Wohnaktivitäten (Sprache, Musik usw.); der Spektrum-Anpassungswert C_{tr} steht vor allem für städtischen Straßenverkehr (*tr*: engl. traffic).

Bewerteter Standard-Trittschallpegel, $L'_{nT,w}$

Der bewertete Standard-Trittschallpegel ist ein auf eine Bezugsnachhallzeit nach ISO 717-1 von T_0 = 0,5 s normierter Trittschallpegel und wird in dB angegeben. Die Berechnung des Einzahlwerts aus den frequenzabhängigen Werten L_{nT} erfolgt analog zum bewerteten Norm-Trittschallpegel $L_{n,w}$.

Bewertete Standard-Schallpegeldifferenz, $D_{nT,w}$

Die bewertete Standard-Schallpegeldifferenz kennzeichnet die normierte Luftschalldämmung zwischen zwei Räumen unter Berücksichtigung der Nachhallzeit im Empfangsraum und der Bezugsnachhallzeit nach ISO 717-2 von T_0 = 0,5 s . Mit der bewerteten Standard-Schallpegeldifferenz kann der Luftschallschutz von Wänden, Decken, Türen und Einbauten zwischen den Räumen berechnet werden. Es handelt sich um eine situationsabhängige Berechnung, an der alle Bauteile beteiligt sind, die an dem betrachteten Trennbauteil anschließen. Die bewertete Standard-Schallpegeldifferenz lässt sich auch aus dem bewerteten Bau-Schalldämm-Maß R'_w sowie der Geometrie des Empfangsraumes bestimmen.

Tieffrequenter Schall

Tieffrequenter Schall ist Schall mit dominierenden Energieanteilen im Frequenzbereich unter 100 Hz. Dieser Frequenzbereich ist für die Ermittlung des baulichen Schallschutzes, insbesondere für die Ermittlung der Schalldämm-Maße (R'_w, $L'_{n,w}$ etc.) nicht enthalten. Der erweiterte Frequenzbereich von 50 Hz bis 5.000 Hz wird ausschließlich für die Spektrumanpassungswerte berücksichtigt.

2 Grundlagen der Bauakustik

2.1 Einleitung

Bauakustik ist ein Gebiet der Bauphysik bzw. der Akustik, welches sich mit der Auswirkung der baulichen Gegebenheiten auf die Schallausbreitung zwischen den Räumen eines Gebäudes bzw. zwischen dem Rauminneren und der Außenwelt beschäftigt. Um zu verstehen, wie sich Schall im Gebäude ausbreiten kann sind nachstehende akustische Kenntnisse erforderlich. Es werden an dieser Stelle ausschließlich die wesentlichen Grundlagen dargestellt, die keinen Anspruch auf Vollständigkeit haben.

2.2 Schwingung und Wellen

Die Kenntnis der Schwingungen und Wellen ist ursprünglich in engstem Zusammenhang mit dem Hören und mit musikalischen Fragen entwickelt worden. Unser Organismus besitzt ja in seinem Ohr einen überaus empfindlichen Indikator für mechanische Schwingungen und Wellen in einem erstaunlich weiten Frequenzbereich (von etwa 16 Hz bis 20.000 Hz). Zweckmäßigerweise werden deshalb allgemeine Fragen der Schwingungs- und Wellenlehre in den Vordergrund dieses Kapitels ausgewählt und gegliedert, um der Raumakustik im engeren Sinn Rechnung zu tragen. Wenn man sich mit der Raumakustik beschäftigt, kommt man nicht umhin sich mit Schallwellen zu befassen. Schallwellen sind mechanische Wellen, die zu ihrer Ausbreitung ein elastisches Medium benötigen. In der Raumakustik ist dieses elastische Medium Luft. Die grundlegenden Gleichungen werden nachstehend kurz wiederholt.

2.2.1 Schwingung

2.2.1.1 Harmonische, elastische Schwingung

Bei einer harmonischen, elastischen Schwingung wechselt die Energie zwischen potentieller und kinetischer Energie. Bei einer Auslenkung aus der Ruhelage stellt sich eine Rückstellkraft F_R ein, die zur Auslenkung s proportional ist: $F_R \sim s$

Die daraus abgeleitete Proportionalitätskonstant D heißt Federkonstante und es gilt das Hooke'sche Gesetz:
$F_R = -D \cdot s$ (1)

Die Rückstellkraft F_R wird von der Trägheitskraft F_T in der Waage gehalten (**drittes newtonsches Axiom: lex tertia:** actio=reactio): $F_R + F_T = 0$ mit $F_T = m \cdot s''$

Die Beschleunigung ist also proportional zur Auslenkung.

Damit ergibt sich folgende Differentialgleichung: $s'' + D/m \cdot s = 0$ (2)
mit $D/m = \omega^2$

Die allgemeine Lösung dieser Differentialgleichung lautet: $s = \hat{s} \sin(\omega_0 t + \varphi_0)$ (3)
mit
$\hat{s}$ = Amplitude
$(\omega_0 t + \varphi_0)$ = Phase
ω_0 = Kreisfrequenz ($\omega = 2\pi f$)
φ_0 = Nullphase

Die Sinusschwingung erreicht wieder den Ausgangswert, wenn $T = 2\pi$, also gilt: $\omega_d = 2\pi/T = 2\pi f$ (4)

mit

T = Schwingungs- oder Periodendauer (s)

f = Frequenz (1 Hz = 1 s^{-1})

Der reziproke Wert der Periodendauer T gibt an, wie viele Schwingungen in der für T gewählten Zeiteinheit stattfinden. Er stellt also die Periodenfrequenz dar, die immer gemeint ist, wenn einfach von der Frequenz f gesprochen wird. In der Zeit $T = 1/f$ wir die Wellenenergie um die Strecke λ weiter transportiert. Es besteht also folgende Beziehung: $c = \lambda / T = f \lambda$

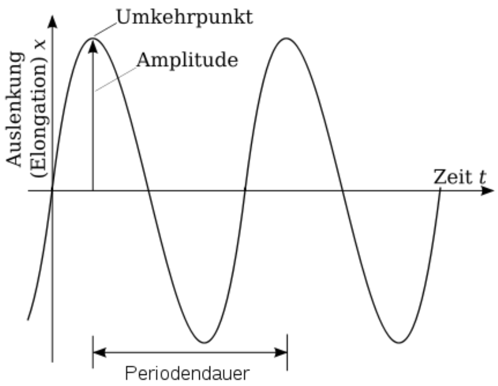


Abb. 1: Diagramm einer harmonischen Schwingung und Darstellung der Periodendauer.

Für Schallwellen gilt wie für andere mechanische Wellen:

$$c = \lambda \cdot f \qquad (5)$$

mit:

c Schallwellengeschwindigkeit in m s^{-1}

λ Wellenlänge in m

f Frequenz in Hz

Mit zunehmender Frequenz wird die Wellenlänge kleiner.
Die Geschwindigkeit von Druckwellen in einem Gas, wie sie bei Luftschall vorliegt, ist konstant und im Allgemeinen nicht abhängig von der Frequenz.
Beim Schall empfinden wir die Frequenz als Tonhöhe. Als tiefster Ton, der eben noch gehört wird und noch als Schall bezeichnet wird, gilt international etwa 16 Hz und als höchster etwa 20.000 Hz.
Nachstehende Tabelle zeigt Schallgeschwindigkeiten (longitudinal) verschiedenster Stoffe bei 20 °C.

Tabelle 1: Schallgeschwindigkeiten verschiedenster Stoffe

Material	***c* in m/s**
Beton (C20/25)	3.655
Stahl	5.850
Gepresster Kork	540
Gummi	150
Holz	3.300 – 5.300
Kupfer	5.010
Luft	343
Wasser	1.484

2.2.1.2 Gedämpfte Schwingung

Bei gedämpften Schwingungen muss im Ansatz auch die Reibungskraft F_{Re} berücksichtigt werden. In vielen Fällen (z.B. Luftreibung) ist sie zu der Geschwindigkeit v proportional:

$$F_{Re} = -bv = -bs' \tag{6}$$

mit b = Dämpfungskonstante

Mit $F_T + F_{Re} + F_R = 0$ erhält man dann: $s'' + b/m \cdot s' + \omega_0^2 s = 0$ (7)

mit ω_0 = Kreisfrequenz des ungedämpften Systems

Die Lösung dieser Gleichung ist: $s = \hat{s}\, e^{-\delta t} \sin(\omega_d t + \varphi_0)$ (8)

mit

ω_d = Kreisfrequenz des gedämpften Systems

δ = Abklingkoeffizient

Zweimaliges Differenzieren und Koeffizientenvergleich ergibt:

$\delta = b/2m$

$\omega_d = (\omega_0^2 - \delta^2)^{1/2}$ (9)

d. h. die Amplitude nimmt exponentiell ab und die Eigenkreisfrequenz ist kleiner als die des ungedämpften Systems.

Trägt man die Auslenkung (Elongation) in Abhängigkeit von der Zeit grafisch dar, ergibt sich für eine gedämpfte Schwingung folgender Verlauf:

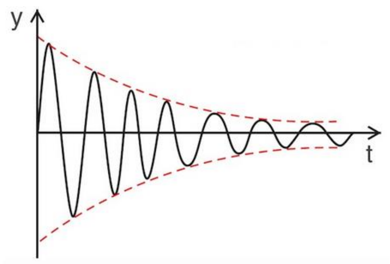


Abb. 2: Diagramm einer harmonischen Schwingung und Darstellung der Periodendauer.

Der Verlauf der Amplitude in Abhängigkeit von der Zeit (gestrichelte, rote Kurve in Abb. 2) zeigt eine abnehmende Exponentialfunktion.

2.2.1.3 Erzwungene Schwingung

Eine erzwungene Schwingung stellt sich ein, wenn ein System (z.B. Wand) durch eine äußerliche, periodisch wirkende Kraft (z.B. Luftschall) zum Mitschwingen angeregt wird. Die Schwingung erfolgt in der Anregungsfrequenz. Die Schwingungsamplitude hängt stark vom Verhältnis zwischen der Erregerfrequenz f_{Err} und der Eigenfrequenz des Systems f_0 ab. Im Fall $f_{Err} = f_0$ spricht man von Resonanz. Bei längerer Erregung mit der Resonanzfrequenz und bei geringer Dämpfung kann, auch bei kleinen äußeren Kräften, ein Resonanzversagen eintreten. Die Schallübertragung von Raum zu Raum oder von außen nach innen erfolgt im Allgemeinen über erzwungene Schwingungen, der trennenden Bauteile (Schalldämmung).

2.2.2 Wellen

Die Wellengleichung ist eine partielle Differentialgleichung vom hyperbolischen Typ für die vom Ort *r* (oder x) und der Zeit *t* abhängige schwingungsfähige Größe *p(r, t)* zur Beschreibung der Ausbreitung von Wellen.
Die einfachsten Verhältnisse erhält man für ein homogenes, isotropes Medium.
Bei Abwesenheit von Dämpfung wird die Wellenausbreitung in diesem Fall durch die d'Alembert‘sche Wellengleichung beschrieben.

$$\frac{1}{c^2}\,\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} - \Delta p = 0 \tag{10}$$

Dabei ist

c Ausbreitungsgeschwindigkeit der Wellen
p Schalldruck
Δ ..der Laplace-Operator (Δ = div(grad)): $\Delta = \sum_i \frac{\partial^2}{\partial x_i^2} = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$

Die Lösung der ebenen fortschreitenden Wellen enthält eine sich in positive x-Richtung und eine sich in negative x-Richtung ausbreitende Welle: $p_x = f(x - ct) + g(x + ct)$ (11)
mit: *f, g* – allgemeine Funktionen.

Physikalische Bedeutung hat für die sich in positive x-Richtung ausbreitende Welle nur der jeweils erste Term. Diese schreitet in der Zeit *Δt* mit *c* um *Δx = c·Δt* fort.

Kennzeichnend für diese Wellenart ist der Umstand, dass der momentane Zustand der Schallfeldgrößen nur von der Koordinate x abhängt und die Schallwelle ohne Dämpfung durch das Medium ihre Form und Amplitude beibehält. Die d'Alembert‘sche Wellengleichung beschreibt die Ausbreitung von Schallwellen in Luft.

Auf Grund der Linearität der d'Alembert‘schen Wellengleichung gilt das Superpositionsprinzip, d.h. verschiedene Wellen breiten sich unabhängig voneinander aus.
Mathematisch gesehen besagt es, dass die Summe zweier Lösungen wieder eine Lösung ist.
Durch die Angabe der Anfangsbedingungen für *p* und $\frac{\partial p}{\partial t}$ im ganzen Raum zu einer Zeit $t = t_0$ ist der räumliche und zeitliche Verlauf der Welle eindeutig bestimmt.
Dabei breiten sich Störungen, die von einem Punkt (x_0, y_0, z_0, t) ausgehen, entlang des zu diesem Punkt gehörigen charakteristischen Kegels $(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2 - \frac{1}{c^2}(t - t_0)^2 = 0$ (12)
aus.
Eine besonders wichtige Klasse von speziellen Lösungen der Gleichung (12) sind ebene, monochromatische Wellen. Sie sind gegeben durch

$$p_{r,t} = \hat{p}\; e^{i(kr - \omega(k)t)} \tag{13}$$

mit $\omega^2 = k^2c^2$, also $\omega = \pm kc$. Wir entscheiden uns für ein Vorzeichen und setzen $\omega(k) = c\,|k|$

Mit dieser Konvention ist die Funktion: $A \cos(k\,x - \omega(k)\,t - \varphi) = A\,e^{i\,(k\,x - \omega(k)\,t)}$
eine nach rechts laufende Welle, wenn k > 0,
eine nach links laufende Welle, wenn k < 0.

Anmerkung: Eine Welle ist monochromatisch, wenn sie nur eine einzige Frequenz enthält.

Jede Lösung der Wellengleichung lässt sich als Überlagerung von Wellen dieses Typs in Form des Fourier-Integrals

$$p = \int p(k) e^{i(kr-\omega(k)t)} + p(-k) e^{i(kr+\omega(k)t)} \qquad (14)$$

darstellen, was ihre große Bedeutung in praktischen und auch theoretischen Fragen begründet.

Für die monochromatische Schallwelle, z.B. ein Ton, d.h. eine harmonische Schwingung mit nur einer Frequenz, gilt für die Zeitabhängigkeit des Schalldrucks: $p(t) = \hat{p} \sin(\omega t)$ (15)

wobei $\hat{p}$ die Schalldruckamplitude und ω die Kreisfrequenz $\omega = 2\pi f$ ist.

2.2.2.1 Wellengleichung für Rechteckräume

2.2.2.1.1 Lösung der Wellengleichung mit schallharten Wänden

Ein dreidimensionales Wellenfeld zu einem Zeitpunkt t_0 wird durch die Helmholtz-Gleichung vollständig beschrieben:

$$\Delta p + k^2 p = 0 \qquad mit\, k = \frac{\omega}{c} \qquad (16)$$

oder in kartesischen Koordinaten

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} + k^2 p = 0$$

Zur Lösung der Helmholtz-Gleichung werden die folgenden Randbedingungen aufgestellt, die auf der Annahme basieren, dass der Schalldruck in einem Raum mit schallharten Wänden an allen Raumbegrenzungsflächen maximal sein muss:

$$\frac{dp_1}{dx} = 0 \qquad \text{für} \qquad x = 0; \quad x = L_x$$

$$\frac{dp_2}{dy} = 0 \qquad \text{für} \qquad y = 0; \quad y = L_y$$

$$\frac{dp_3}{dz} = 0 \qquad \text{für} \qquad z = 0; \quad z = L_z$$

Zur Aufstellung der Randbedingungen wurde der Schalldruck in drei Komponenten aufgeteilt:

$$p(x, y, z) = p_1(x) p_2(y) p_3(z)$$

umso für jede Raumrichtung eine eigene Differentialgleichung zu erhalten:

$$\frac{d^2 p_1}{dx^2} + k_x^2 p_1 = 0 \qquad \text{etc.}$$

Der analoge Ausdruck für die Wellenzahl lautet:

$$k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 = k^2 \qquad (17)$$

Durch Einsetzen der Randbedingungen für $x = 0$ nach $x = L_x$ ergibt sich folgende Lösung.

$p_{1(x)} = A_1 \cos(k_x x) + B_1 \sin(k_x x)$

Analoge Ergebnisse für $y = L_y$ und $z = 0$ nach $z = L_z$.

Es erscheint einleuchtend, dass die Konstante B_1 gleich Null gesetzt werden muss, weil die Sinusfunktion die Randbedingung für $x = 0$ nicht erfüllen kann. Es bleibt also:

$$p_1(x) = A_1 cos(k_x x)$$

Damit die zweite Randbedingung für $x = L_x$ erfüllt wird, sind für die Wellenzahl k_x nur ganzzahlige Vielfache von π erlaubt:

$$k_x = \frac{n_x \pi}{L_x}$$

Durch Einsetzen dieser Gleichung und der analogen Ausdrücke für k_y und k_z in (17) erhält man:

$$k_{n_x\, n_y\, n_z} = \pi \sqrt{\left(\frac{n_x}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{L_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{L_z}\right)^2}$$

Die Koeffizienten n_x, n_y, n_z sind dabei die Ordnungszahlen der Raummoden und geben die Gitternetzknotenebenen des Schalldrucks für die Randbedingungen an. Sie dürfen nur positive ganzzahlige Werte annehmen. Da die Frequenz nicht Null werden kann, muss der Fall, dass alle drei Koeffizienten Null sind, ausgeschlossen werden. Sollen nun die Eigenfrequenzen des Raumes berechnet werden, erhalten wir nach Gleichung (18) für jede Koordinatenachse eine Eigenschwingung bzw. Resonanz des Raumes.
Multipliziert man die Gleichung mit $\frac{c}{2\pi}$, so erhält man die Gleichung für die Eigenfrequenzen oder Resonanzen des Raums: $f_{n_x n_y n_z} = \frac{c}{2\pi} k_{n_x n_y n_z}$

$$f_{n_x n_y n_z} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{L_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{L_z}\right)^2} \qquad (18)$$

2.2.2.1.2 Lage und Dichte der Resonanzen

Die einfachste Form der Resonanz ist die **Axialmode**. Entspricht die Wellenlänge einem Vielfachen der Länge einer Raumkante des Rechteckraums, überlagern sich die hin- und zurücklaufende Welle dergestalt, dass sich Wellenbäuche und -täler exakt verstärken und sich eine sogenannte "stehende Welle“ aufbauen kann.
Die Axialmoden werden in Gleichung (18) durch alle diejenigen Ausdrücke für die Frequenz *f* beschrieben, in denen nur einer der drei Koeffizienten von Null verschieden ist.
Tangentialmoden, bei denen zwei der Koeffizienten größer als Null sein müssen, bauen sich zwischen vier Wänden, schräge Moden zwischen sechs Wänden auf. Die Tabelle 2 zeigt beispielhaft eine Übersicht über die berechneten Moden in einem Beispielraum bis 100 Hz.

Abbildung 3 stellt die Modendichte und die Ordnungszahl der Moden über der Frequenz in diesem Beispielraum exemplarisch dar.

Tabelle 2: Moden bis 100 Hz in dem Beispielraum

Mode	Frequenz	Mode	Frequenz	Mode	Frequenz
010	24,57	021	68,54	310	89,44
100	28,67	030	73,71	131	92,40
110	37,76	121	74,29	230	93,39
001	47,78	201	74,63	002	95,56
020	49,14	220	75,51	040	98,29
011	53,73	211	78,57	301	98,38
101	55,72	130	79,09	012	98,66
120	56,89	300	86,00	320	99,05
200	57,33	031	87,84	102	99,76
111	60,90	221	89,36	311	101,4
210	62,38				

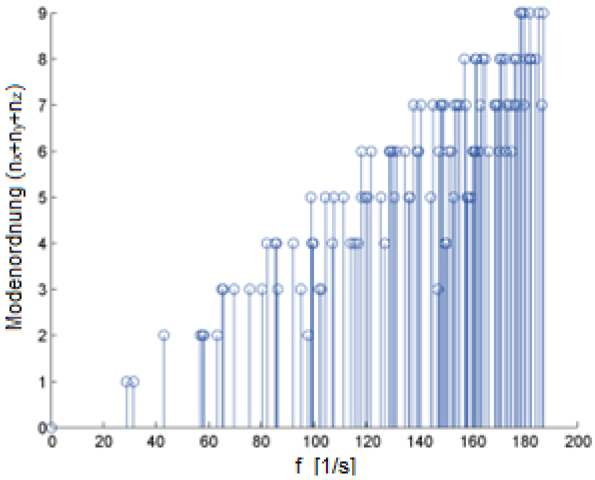


Abb. 3: Modendichte. Die Höhe des Balkens entspricht der Summe der Ordnungszahlen ($n_x + n_y + n_z$).

Die Abbildung 3 zeigt, dass mit größer werdender Ordnungszahl der Moden nicht nur die Frequenz der Resonanzen, sondern auch die Anzahl der Resonanzen pro Oktave, also die "Eigenfrequenzdichte“ steigt. Dies lässt sich dadurch veranschaulichen, indem man die Gleichung (18) in einem Koordinatensystem darstellt (siehe Abb. 4). In diesem Koordinatensystem sind die Eigenfrequenzen in den drei Raumrichtungen f_x, f_y, f_z gegeneinander aufgetragen. Da die Eigenfrequenzen nur die diskreten Werte $f_x = \frac{cl}{2L_x}$ annehmen können, ergibt sich für $f_{x,y,z}^2 = f_x^2 + f_y^2 + f_z^2$ ein Punktegitter. Die Länge des Vektors vom Ursprung zu Punkt [*x y z*] entspricht dem Wert der Resonanzfrequenz.

Betrachtet man den Vektor zu Punkt [*x y z*] als Radius einer Kugel um den Ursprung, so ist leicht einzusehen, dass die Anzahl der Punkte innerhalb der Kugel mit Anwachsen der Vektorlänge nicht linear, sondern kubisch ansteigt. Zur genauen Bestimmung der Punktanzahl ist das Volumen der Kugel

$$V_{Kugel} = \frac{4}{3}\pi f^3$$

durch die Volumeneinheit des Gitters pro Punkt

$$V_{Punkt} = (f_{x,k} - f_{x,k-1})(f_{y,k} - f_{y,k-1})(f_{z,k} - f_{z,k-1}) = \frac{c^3}{8L_xL_yL_z} = \frac{c^3}{8V_{Raum}}$$

zu dividieren.

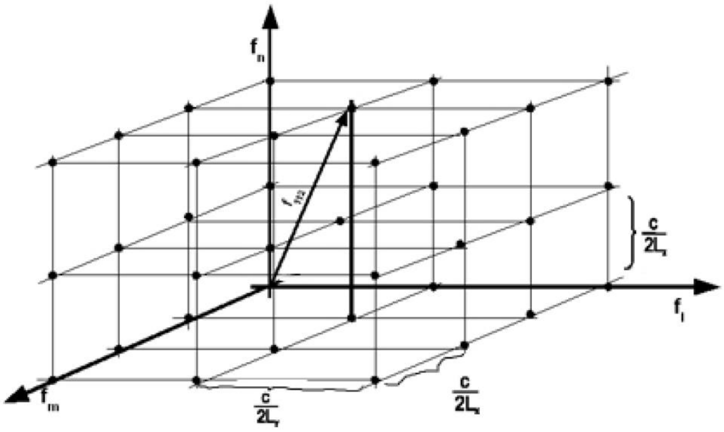


Abb. 4: Eigenfrequenzgitter. Die Länge des Vektors entspricht der Resonanzfrequenz der (1,1,2)–Mode.

Da nur positive Frequenzen eine Bedeutung für die Praxis haben und somit lediglich der erste Oktant des Koordinatensystems von Interesse ist, reduziert sich die Zahl der Punkte auf ein Achtel des berechneten Wertes. Die Anzahl *N* der Raummoden bis zur Frequenz *f* beträgt somit:

$$N \approx \frac{4}{3}\pi V \left(\frac{f}{c}\right)^3 \qquad (19)$$

Entsprechend ergibt sich die mittlere Eigenfrequenzdichte zu

$$\frac{dN_f}{df} \approx \frac{4}{3}\pi V \frac{f^2}{c^3} \qquad (20)$$

und der mittlere Eigenfrequenzabstand zu

$$< \Delta f_{max} > \approx \frac{c^3}{4\pi V f^2} \qquad (21)$$

Für kleine Räume liefert Gleichung (19) leider sehr ungenaue Werte. Grund dafür ist die vereinfachende Anschauung der Punktvolumina als Quader sowie die Reduktion des Koordinatensystems auf einen Oktanten. Der Vollständigkeit halber soll hier, auch ohne Herleitung, die exakte Gleichung zur Bestimmung der Eigenfrequenzanzahl erwähnt werden:

$$N_f = \frac{4}{3}\pi V \left(\frac{f}{c}\right)^3 + \frac{\pi}{4} S \left(\frac{f}{c}\right)^2 + \frac{L}{8}\frac{f}{c} \qquad (22)$$

mit dem Raumvolumen $V = L_x\, L_y\, L_z$, der Gesamtoberfläche $S = 2(L_xL_y + L_yL_z + L_xL_z)$ und der Gesamtkantenlänge $L = 4\,(L_x + L_y + L_z)$.
Mit dieser Gleichung lässt sich ein wesentlicher Unterschied zwischen großen und kleinen Räumen verdeutlichen.
Denken wir uns einen kleinen Raum A mit den Maßen 4 × 3 × 2 m³ im Vergleich zu einem großen Raum B mit den Abmessungen 50 × 25 × 10 m³. Nach Gleichung (22) ergibt sich für Raum A bis 100 Hz eine Modenanzahl von 7, für Raum B hingegen schon von 1579. Der mittlere Eigenfrequenzabstand bei 100 Hz beträgt für Raum A 13,4 Hz, für Raum B aber nur 0,03 Hz. Das bedeutet, dass im großen Raum bei 100 Hz die Raummoden mit drei Resonanzen zwischen 100 und 101 Hz bereits so dicht liegen, dass ein quasi linearer Frequenzgang erreicht ist. Zwei Resonanzspitzen mit einem Abstand von 13 Hz hingegen, wie in Raum A, bei 100 Hz immerhin bereits eine Terz auseinander, werden den Klang im Raum erheblich verfärben.

2.2.2.1.3 Lösung der Wellengleichung mit nicht schallharten Wänden

Mit Hilfe der Betrachtung in Abschnitt 2.2.2.1.1, können wir die Lage der Eigenfrequenzen in beliebigen Rechteckräumen bereits genau bestimmen. In der Realität gibt es keine Räume mit vollkommen schallharten Wänden. Selbst in Hallräumen liegen die Absorptionsgrade in der Regel zwischen 0,01 und 0,03. In einem idealen Hallraum mit dem Absorptionsgrad $\alpha = 0$ über den gesamten Frequenzbereich für alle Wände, kann sich für keine Frequenz außer für die Eigenfrequenzen ein Schallfeld aufbauen und im Knotenpunkt einer Resonanz ist der Schalldruck $p = 0$. Die Bedämpfung der Wände bewirkt, dass sich die Energie der Resonanzspitzen auf einen größeren Frequenzbereich verteilt, die Resonanzspitzen werden also sowohl breiter als auch schwächer. Mit ansteigender Wanddämpfung wird der Frequenzgang des Raumes mit gleichzeitig sinkenden Schalldrücken immer linearer, bis er für den idealen schalltoten Raum mit unendlicher Wanddämpfung die Gerade $p = 0$ erreicht. In diesem Raum kann sich nur Direktschall ausbreiten. Weder der Aufbau eines stationären Schallfeldes noch die Entwicklung einer Raumantwort durch Reflexionen ist möglich. Um die Wandbeschaffenheit zu berücksichtigen, muss die spezifische Impedanz der Wände ζ in die Differentialgleichung mit einfließen, so dass die Randbedingungen für die sechs Wände lauten:

$$\zeta_x \frac{dp_1}{dx} = ikp_1 \qquad \text{für } x = 0$$

$$\zeta_x \frac{dp_1}{dx} = -ikp_1 \qquad \text{für } x = L_x$$

$$\text{etc.}$$

Daraus ergibt sich nun eine komplexe Lösung für die Wellenzahl k:

$$\underline{k}_{lmn} = \frac{\omega_{lmn}}{c} + j\frac{\delta_{lmn}}{c} \tag{23}$$

wobei der Realanteil erwartungsgemäß nicht von der Lösung für den unbedämpften Fall (16) abweicht, wohingegen sich im Imaginäranteil, im Unterschied zu (16) nun > 0, die Dämpfung wiederfindet, die sich auch durch den Reflexionsgrad R ausdrücken lässt:

$$\delta = -\frac{c}{L} ln|R|$$

Die Dämpfung jeder Raumresonanz $f_{l\,m\,n}$ hängt nicht nur vom Absorptionsgrad jeder einzelnen Wand, sondern auch vom Winkel ϑ ab, in dem sich die stehende Welle der ($l\ m\ n$)–Mode zwischen den Wänden aufbaut:

$$\delta_{lmn} = \frac{c}{4}\left(\frac{\cos\vartheta_x}{l}(\alpha'_{x0} + \alpha'_{xL}) + \frac{\cos\vartheta_y}{m}(\alpha'_{y0} + \alpha'_{yL}) + \frac{\cos\vartheta_z}{n}(\alpha'_{z0} + \alpha'_{zL})\right) \tag{24}$$

Dabei meint der Ausdruck α'_{x0} den genauen Ausdruck des Absorptionsgrades

$$\alpha'_{x0} = -\ln(1 - \alpha_{x0}) \tag{25}$$

für die Wand, die an der Stelle $x = 0$ senkrecht auf der x-Achse steht (entsprechend auch für die Absorptionsgrade der übrigen Wände).

Selbstverständlich wäre es auch möglich, die Absorptionsgrade frequenzabhängig auszudrücken, um einen von f abhängigen Ausdruck für die Dämpfung zu erhalten.
Da in diesem Zusammenhang jedoch nur der Bassbereich des Spektrums von Interesse ist, ist es ausreichend, die Dämpfung als konstant anzusehen. Bei näherer Betrachtung der Formel für die Dämpfung sieht man, dass der Wert für die Axialmoden am geringsten ist. Außerdem ist festzustellen, dass alle harmonisch zueinander

liegenden Resonanzen denselben Dämpfungswert besitzen. Der Grund dafür ist, dass sowohl die Anzahl der Reflexionen pro Zeiteinheit als auch der Winkel der stehenden Wellen zu den Wänden für alle Vielfachen gleich ist.

Abbildung 5 zeigt in einem Stabdiagramm die Dämpfung aller Resonanzen bis zur Schröder-Frequenz in einem Beispielraum mit den Abmessungen: 5 × 4 × 3 m³. Der Absorptionsgrad beträgt für alle Wände $\alpha = 0{,}3$.

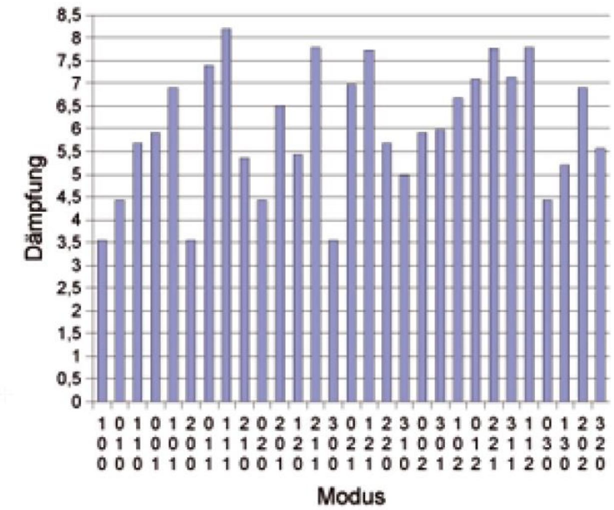


Abb. 5: Die ersten 30 Raummoden mit der zugehörigen Dämpfung in einem Raum mit den Abmessungen: 5 × 4 × 3 m³. Alle Wände haben den Absorptionsgrad 0,3.

2.2.2.2 Wellenarten

Physikalisch gesehen ist Schall eine als Welle fortschreitende mechanische Deformation in einem Medium.
In ruhenden Gasen und Flüssigkeiten ist Schall immer eine Longitudinalwelle, also näherungsweise auch in Luft. Nach der Theorie sind nur unendlich große, ebene, konphas schwingende Platten oder Wände in der Lage, ebene Wellen und somit ein ebenes Wellenfeld im freien Raum mit den Koordinaten *x*, *y*, *z* zu erzeugen. Ebene Wellen sind dadurch gekennzeichnet, dass die sich ausbreitenden Wellenfronten Ebenen sind. Die Kenngrößen des Schallfeldes, der skalare Druck *p* und die Vektorgröße $\vec{v}$, die Schallschnelle, haben die gleiche Phasenlage. Die Schallkennimpedanz, d.h. der Wellenwiderstand

$$\underline{Z}_0 = \frac{\underline{p}}{\underline{v}} = \rho_0 \cdot c \qquad (26)$$

ist somit eine rein reelle Größe.

Die Richtung der Schnelle $\vec{v}$ stimmt mit der Ausbreitungsrichtung der Welle überein.
Die allgemeine Wellengleichung für dreidimensionale Schallfelder lautet:

$$\Delta p = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2}$$

Darin ist Δ der Laplace-Operator (Δ = div(grad)): $\Delta = \sum_i \frac{\partial^2}{\partial x_i^2} = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ (27

Schall breitet sich mit einer für das Medium und dessen Zustand (Temperatur, Druck usw.) charakteristischen und konstanten Schallgeschwindigkeit *c* aus.

Die Lösung der ebenen fortschreitenden Wellen enthält eine sich in positive x-Richtung und eine sich in negative x-Richtung ausbreitende Welle:

$$p_x = f(x - ct) + g(x + ct) \tag{28}$$

mit:
f, g – allgemeine Funktionen.

Physikalische Bedeutung hat für die sich in positive x-Richtung ausbreitende Welle nur der jeweils erste Term. Diese schreitet in der Zeit Δt mit c um $\Delta x = c \cdot \Delta t$ fort. Kennzeichnend für diese Wellenart ist der Umstand, dass der momentane Zustand der Schallfeldgrößen nur von der Koordinate x abhängt und die Schallwelle ohne Dämpfung durch das Medium ihre Form und Amplitude beibehält.

Im Allgemeinen ist die Schallgeschwindigkeit aber von den atmosphärischen Bedingungen abhängig. Am wichtigsten ist der Einfluss der Temperatur (T) auf die Schallgeschwindigkeit, während die Luftfeuchtigkeit (φ) nur einen geringeren Einfluss hat. Dagegen spielt der Luftdruck keine Rolle. Der Schall bewegt sich langsamer mit steigender Höhe über NN, was auf die Änderungen der kühler werdenden Temperatur zurückzuführen ist. Näherungsweise kann die Schallgeschwindigkeit in Metern pro Sekunde wie folgt berechnet werden: $c_{\mathrm{Luft}} = (331{,}5 + 0{,}6^\circ \mathrm{C}^{-1} \cdot \vartheta)$ (29)

Bei einer Temperatur von 20 °C beträgt die Schallgeschwindigkeit in Luft 343 m/s.

Die Wellenlänge λ der Schallwelle kann bei gegebener Frequenz f und Schallgeschwindigkeit c über folgende Beziehung berechnet werden: $\lambda = \frac{c}{f}$ (30)

Die Wellenlänge ist grafisch veranschaulicht der Abstand zwischen zwei benachbarten Wellenbergen oder allgemeiner zwischen zwei benachbarten Punkten gleicher Phase (das sind Punkte mit gleicher Auslenkung und gleicher Steigung). Nachstehende Grafik verdeutlicht den Sachverhalt:

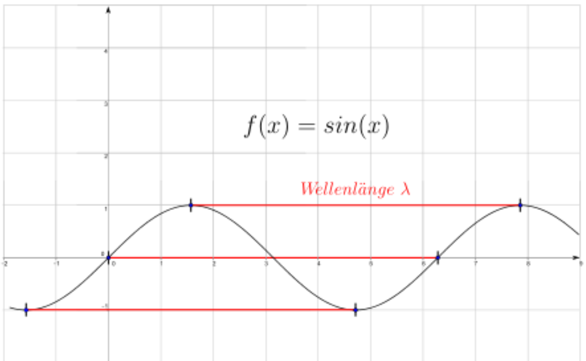


Abb. 6: Darstellung einer Sinuswelle als Funktion des Weges

Definition: Eine Welle ist ein zeitlich periodischer Vorgang, bei dem die einzelnen Teilchen (gekoppelte) Schwingungen ausführen.

Wellengleichungen:

$s = \hat{s} \sin [2\pi\, f\, (t - x/c)]$ (31)

$s = \hat{s} \sin [2\pi\, f\, (t - x/\lambda)]$ (32)

$s = \hat{s} \sin [2\pi\, f\, (t - kx)]$ (33)

zeitliche Abhängigkeit	*örtliche Abhängigkeit*
f = Frequenz	c = Phasengeschwindigkeit
T = Schwingungsdauer	λ = Wellenlänge
ω = Kreisfrequenz ($2\pi f$)	k = Kreiswellenzahl ($2\pi/\lambda = \omega / c$)

Allgemein gilt: $$\lambda = \frac{c}{f} = cT \qquad (34)$$

Im Falle harmonischer Ausbreitungsvorgänge in verlustfreien Medien wird häufig die reelle Wellenzahl k verwendet:

$$k = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi f}{c} = \frac{2\pi}{\lambda} \qquad (35)$$

Die Schallfeldgrößen und Wellengleichungen werden für den Fluidschall bei kleinen Amplituden (lineare Schallausbreitung) behandelt. Als (linearisierte) Grundgleichungen dienen dazu die Bewegungsgleichung, die Kontinuitätsgleichung und die Zustandsgleichung.

2.2.2.2.1 Longitudinal- und Transversalwellen

Es gibt ein-, zwei- und dreidimensionale Wellen. Abhängig von der Bewegungsrichtung der Teilchen x relativ zur Ausbreitungsrichtung der Welle v unterscheidet man grundsätzlich zwischen Transversalwellen ($x \perp v$) und Longitudinalwellen (x ll v). In Gasen (z.B. Luft) existieren nur Longitudinalwellen.

Eine Longitudinalwelle (von lat. longus „lang“) ist eine physikalische Welle, die in Ausbreitungsrichtung schwingt. Ihr Gegenstück ist die Transversalwelle, deren Amplitude senkrecht zur Ausbreitungsrichtung steht. Longitudinalwellen sind Druckwellen. Das bedeutet, dass sich in einem Medium Zonen mit Überdruck bzw. Druckspannung (bzw. Unterdruck oder Zugspannung) in der Ausbreitungsrichtung fortpflanzen bzw. verschieben oder ausbreiten. Die einzelnen Teilchen im Ausbreitungsmedium, Atome oder Moleküle, schwingen hierbei in Richtung der Ausbreitung um den Betrag der Amplitude hin und her. Nach dem Durchlauf der Schwingung bewegen sich die Teilchen wieder an ihre Ruhestellung, die Gleichgewichtslage, zurück. Durch die Ausbreitung der Schwingung geht keine Energie verloren, abgesehen von Reibungsverlusten zwischen den Teilchen.

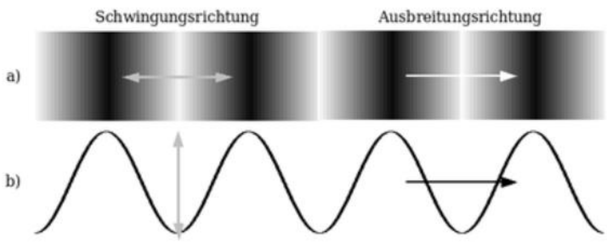


Abb. 7: Schwingungs- und Ausbreitungsrichtung einer Longitudinalwelle (a) und einer Transversalwelle (b)

Die Leistung einer Longitudinalwelle ist proportional zum Quadrat der Amplitude der Auslenkung oder der Druckspannung (siehe z.B. Schalldruck).

Longitudinalwellen können sich in jedem Medium, ob fest, flüssig oder gasförmig ausbreiten, wogegen sich Transversalwellen nur in Festkörpern ausbreiten können.

2.2.2.2.2 Biegewellen

In der Bauakustik besitzen neben den Longitudinal- und Transversalwellen hinaus die so genannten **Biegewellen** eine besondere Bedeutung. Die mathematische Beschreibung der Deformationszustände in Festkörpern kann meistens auf ein- bzw. zweidimensionale Ausbreitungsvorgänge beschränkt werden. Die Ausbreitung in Platten erfolgt in Form von Biegewellen.
Biegewellen sind eine Form von Transversalwellen. Sie treten in plattenartigen Körpern auf und sind dadurch gekennzeichnet, dass die gesamte Platte sich membranartig verformt.

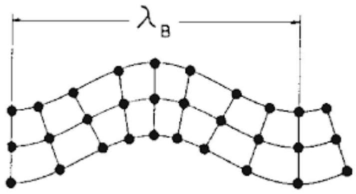


Abb. 8: Schematische Darstellung einer Biegewelle

Die 2-dimensionale Biegewellengleichung für die homogene Platte lautet:

$$\frac{\partial^4 v}{\partial x^4} + 2\frac{\partial^4 v}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 v}{\partial y^4} - \frac{m''}{B'}\omega^2 v = \frac{j\omega p}{B'}. \qquad (36)$$

mit: v - Schallschnelle [m/s]

Dabei ist

$$m'' = \rho h \qquad (37)$$

h - Dicke der Platte [m]

ρ - Dichte der Platte [kg/m^3]

und

$$B' = \frac{E}{(1-\mu^2)}\frac{h^3}{12} \qquad (38)$$

μ - Querkontraktionszahl

Bei der eindimensionalen Wellenausbreitung, angeregt durch eine auftreffende Schallwelle, ergibt sich die Biegewellengleichung zu

$$\frac{1}{k_B^4}\frac{\partial^4 \underline{v}}{\partial x^4} - \underline{v} = \frac{j\,\underline{p}_a}{m''\omega} \qquad (39)$$

mit:

k_B - Biegewellenkennzahl

mit $k_B^4 = \frac{m''}{B'}\omega^2$ (40)

Die Schallgeschwindigkeit der Biegewelle ist von der Frequenz und den Bauteileigenschaften, wie z.B. Dicke, Dichte und E-Modul, abhängig. Die Wellenlänge ist für die verschiedenen Frequenzen konstant.

Für Platten gilt: $$c_B = \sqrt{2\pi f}\sqrt[4]{\frac{B'}{m''}} \tag{41}$$

$$c_B \approx 1{,}35\sqrt{hc_L f} \tag{42}$$

und

$$\lambda_B \approx 1{,}35\sqrt{\frac{hc_L}{f}} \tag{43}$$

mit:

c_B	Biegewellengeschwindigkeit in [ms^{-1}]
c_L	Longitudinalwellengeschwindigkeit [ms^{-1}]
λ_B	Biegewellenlänge in [m]
B'	breitenbezogene Biegesteifigkeit in [kgm² s^{-2}]
f	Frequenz in [Hz]
h	Dicke der Platte in [m]
m''	flächenbezogene Masse in [kgm^{-2}]
f	Frequenz in [Hz]

Anmerkung:
„Biegesteifigkeit“ wird hier als akustischer Begriff verwendet und bedeutet keinesfalls, dass das Bauteil aus statischer Sicht weich oder nicht belastbar ist.

Die von der Biegesteifigkeit je Breiteneinheit der Platte *B‘* und ihrer flächenbezogenen Masse *m'* abhängende Biegewellen-Ausbreitungsgeschwindigkeit c_B ist abhängig von der Frequenz *f*. Die Zunahme der Biegewellen-Ausbreitungsgeschwindigkeit mit der Frequenz wird als Dispersion bezeichnet.
Durch die Dispersion der Biegewellen in plattenförmigen Bauteilen (z.B. einer Stahlbetondecke oder -wand) kann die Biegewellenausbreitungsgeschwindigkeit im Vergleich zur Schallausbreitungsgeschwindigkeit in Luft kleiner, gleich oder größer sein.

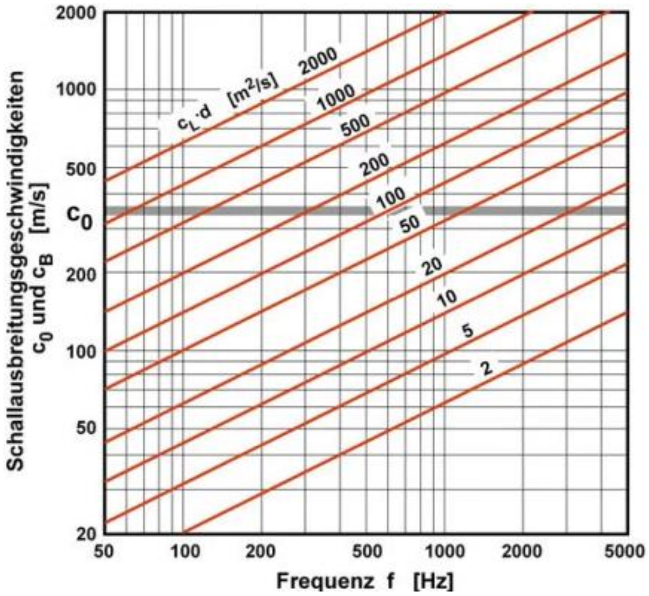


Abb. 9: Grafische Darstellung der Dispersion von Biegewellen, d.h. das Anwachsen der Biegewellengeschwindigkeit mit zunehmender Frequenz. Als Parameter dient dabei das Produkt aus Longitudinalgeschwindigkeit c_L und Plattendicke *d*.

Die Biegewellengeschwindigkeit im Bauteil steigt mit der Frequenz an. In diesem Fall unterscheidet sie sich von der Luftschallgeschwindigkeit, welche konstant bleibt.
Im Vergleich dazu bleibt die Biegewellenlänge konstant, während die Luftschallwellenlänge mit steigender Frequenz kleiner wird.

Aus obiger Gleichung ist ersichtlich, dass die Biegesteifigkeit der Masse reziprok proportional ist.
Aus diesem Grunde ist in der Bauakustik die sogenannte Koinzidenzgrenzfrequenz (f_g) eines Bauteils für die erreichbare Schalldämmung von größter Bedeutung, sie berechnet sich nach folgender Gleichung:

$$f_{\mathrm{g}} = \frac{c_0^2}{2\pi}\sqrt{\frac{m''}{B'}} \tag{44}$$

mit:

f_g Koinzidenzgrenzfrequenz in [Hz]
B' breitenbezogene Biegesteifigkeit in [kgm² s^{-2}]
m'' flächenbezogene Masse in [kgm^{-2}]
c_0 Schallgeschwindigkeit in Luft in [ms^{-1}]

Für Abschätzungen genügt die Beziehung: $$f_{\mathrm{g}} \approx \frac{6{,}4\cdot 10^7}{t}\sqrt{\frac{\rho}{E}} \approx \frac{6{,}4\cdot 10^4}{c_{\mathrm{L}}\cdot t} \tag{45}$$

mit:

c_L Longitudinalwellengeschwindigkeit in [m/s]
E Elastizitätsmodul in (Pa)
t Plattendicke in [m]
ρ Dichte des Materials in [kg/m³]

Die Koinzidenzgrenzfrequenz oder kurz: Grenzfrequenz von Bauteilen ist die Frequenz, bei der die Wellenlänge des Luftschalls mit der Länge der freien Biegewelle der Bauteile übereinstimmt (Spuranpassung).

Die Grenzfrequenz, wird also bestimmt durch das Verhältnis der flächenbezogenen Masse zur Biegesteifigkeit des Bauteils. Aufgrund der Lage der Grenzfrequenz unterscheidet man die Bauteile in biegeweich und biegesteif.

- Biegeweiches Bauteil Koinzidenzgrenzfrequenz eines Bauteils oberhalb von 1.500 Hz,
  Beispiel: Gipsplatte d ≤. 25 mm
- Biegesteifes Bauteil Koinzidenzgrenzfrequenz eines Bauteils unterhalb von 200 Hz,
  Beispiel: Massivbauteile aus Stahlbeton

Zu den biegeweichen Platten gehören z.B.
- Gipsplatten mit einer Dicke ≤ 18 mm,
- Putzschalen, z.B. auf rohr- oder Drahtgewebe,
- Holzwolle-Leichtbauplatten, einseitig verputzt, auf Unterkonstruktion oder freistehend,
- Faserzementplatten mit einer Dicke ≤ 10 mm,
- Glasplatten mit einer Dicke ≤ 8 mm
- Stahlblech mit einer Dicke ≤ 2 mm,
- Spanplatten mit einer Dicke ≤ 16 mm.

Die Schalldämmung ist umso besser, je weniger starr die Verbindung der beiden Schalen durch die Unterkonstruktion ist und je schwerer die schwere Schale bei zweischaligen Bauteilen aus einer schweren, biegesteifen Schale mit biegeweicher Vorsatzschale ist.

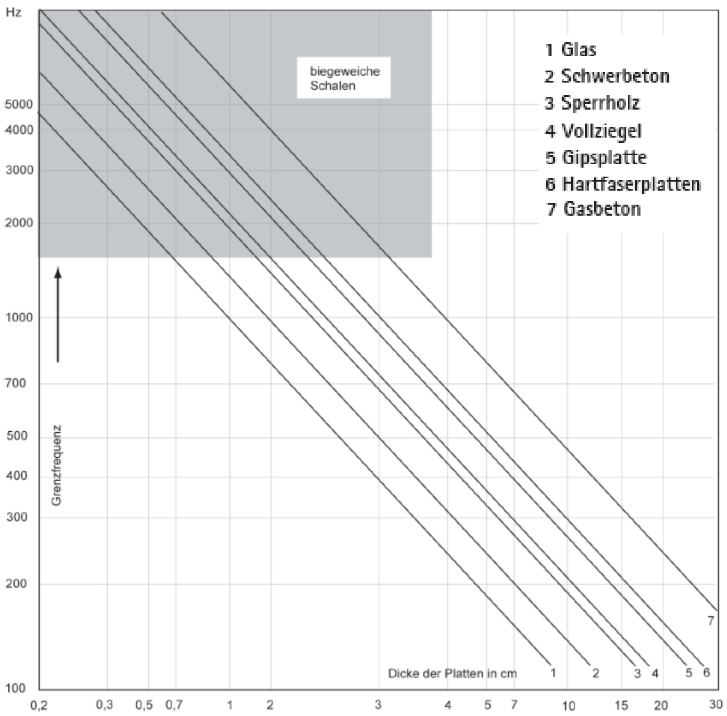


Abb. 10: Grenzfrequenzen von Platten aus verschiedenen Baustoffen abhängig von ihrer Dicke.

Wenn im Bereich oberhalb der Grenzfrequenz eine Spuranpassung auftritt, dann wird die Luftschalldämmung verringert. Es ist deshalb im Sinne eines guten Schallschutzes notwendig, anstelle einer 25 mm dicken Gipsplatte (z.B. aus brandschutztechnischer Sicht), 2 x 12,5 mm Gipsplatten einzusetzen.

3 Resonanz

Als Resonanz werden in der Physik Vorgänge bezeichnet, bei denen ein schwingungsfähiges System mit seiner Eigenfrequenz durch Energiezufuhr angeregt wird. Hierdurch kann die Amplitude des angeregten Systems auf ein Vielfaches der Erregeramplitude ansteigen. Diejenige Frequenz, bei der die Schwingungsamplitude der beiden Schalen gegeneinander ein Maximum erreicht nennt man Resonanzfrequenz f_0.

3.1 Zweischalige Konstruktionen

Eine zweischalige Baukonstruktion stellt ein Schwingungssystem dar, bei dem die Zwischenschicht (Luftpolster oder Dämmstoff) im Hohlraum als Feder zwischen zwei schwingenden Massen wirkt.
Bei solchen Schwingungssystemen (Masse-Feder-System) lassen sich drei Frequenzbereiche unterscheiden:

a) $f < f_0$ (Frequenzbereich Kopplung)
   Die Anregung ist kleiner als die Eigenschwingung des Systems. In diesem Bereich schwingen beide Massen, als wenn sie starr miteinander verbunden wären.

b) $f = f_0$ (Frequenzbereich Gegenkopplung)
   Die Anregung entspricht der Eigenschwingung des Systems (Resonanz). Beide Massen schwingen unter Zusammendrücken der Zwischenschicht gegeneinander mit größter Amplitude.

c) $f > f_0$ (Frequenzbereich Entkopplung)
   Bei größer werdender Anregung (oberhalb der Resonanzfrequenz) entkoppeln sich die beiden Massen voneinander. Die Amplituden werden kleiner als die Anregung.

Die Lage der Resonanzfrequenz f_0 wird umso niedriger,

- je größer der Abstand der Schalen zueinander ist
- je geringer die dynamische Steifigkeit *s'* der federnden Dämmschicht ist
- je größer die Flächengewichte der Schalen sind. Allerdings muss hier darauf geachtet werden, dass die Biegeweichheit der Schalen erhalten bleibt (Grenzfrequenz oberhalb 2.000 Hz).

Die Resonanzfrequenz zweier Massen mit federnder Zwischenschicht lässt sich allgemein ermitteln nach:

$$f_0 = \frac{10^3}{2\pi}\sqrt{s'\left(\frac{1}{m'_1}+\frac{1}{m'_2}\right)} \approx 160\cdot\sqrt{s'\left(\frac{1}{m'_1}+\frac{1}{m'_2}\right)} \qquad (46)$$

mit

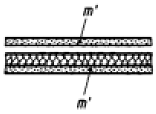
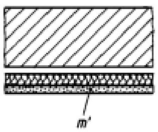
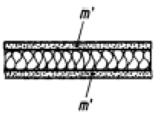
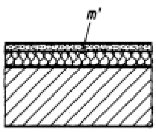
f_0 Resonanzfrequenz in Hz

s' dynamische Steifigkeit der federnden Dämmschicht in N/m³

m' flächenbezogene Masse der Einzelschale in kg/m²

In Tabelle 3 sind nachstehend Zahlenwertgleichungen zur Bestimmung der Eigenfrequenz f_0 für einige typische Anwendungsfälle angegeben. Diese Gleichungen gelten nur für den Fall, dass die mit *m'* bezeichneten Schalen biegeweich*) ausgeführt werden.

Tabelle 3: Zahlenwertgleichungen zur Bestimmung der Eigenfrequenz f_0

Spalte	1	2	3
Zeile	Aufbau der zweischaligen Bauteile		Gleichung für f_0
1	Zwei biegeweiche Schalen, Luftschicht mit schallabsorbierender Einlage		$f_0 \approx \frac{85}{\sqrt{m' \cdot s}}$
2	Biegeweiche Schale vor schwerer, biegesteifer Wand oder als Unterdecke von Massivdecken, Luftschicht mit schallabsorbierender Einlage		$f_0 \approx \frac{60}{\sqrt{m' \cdot s}}$
3	Zwei biegeweiche Schalen mit Dämmschicht, die mit beiden Schalen vollflächig verbunden ist		$f_0 \approx 225\sqrt{\frac{s'}{m'}}$
4	Biegeweiche Schale vor schwerer, biegesteifer Wand mit Dämmschicht, die mit beiden Schalen verbunden ist, auch schwimmender Estrich auf Massivdecke		$f_0 \approx 160\sqrt{\frac{s'}{m'}}$

*) Biegeweiche Platten haben eine wesentliche Bedeutung für die Konstruktion zweischaliger Bauteile. Zu den biegeweichen Platten gehören z.B. Gipsbauplatten mit einer Dicke ≤ 25 mm

In den Gleichungen bedeuten:

f_0 Eigenfrequenz in Hz

m' flächenbezogene Masse einer biegeweichen Schale in kg/m²

s Schalenabstand in m

s' dynamische Steifigkeit der Dämmschicht in MN/m³

Nachstehend sind verschiedene Materialien und ihre dynamischen Steifigkeiten tabellarisch wiedergegeben.

Tabelle 4: Materialien und ihre dynamischen Steifigkeiten *s'*

Materialart	Dicke ohne Belastung [mm]	Dicke im eingebauten Zustand [mm]	dynamische Steifigkeit s' [MN/m³]
Glaswolle	13	10	16
	20	15	10
	25	20	8
	30	25	6
	35	30	13
	40	35	5
Holzwolle-Leichtbauplatte lose verlegt	25	25	200...500
Holzwolle-Leichtbauplatte im Mörtelbett	25	25	700...1500
Kokosfasermatte	10	7	36
	15	12	29
Korkplatte, lose verlegt		12	550
Polystyrol-Hartschaumplatte, extrudiert XPS	20	20	770
	40	40	390
	60	60	260
	80	80	190
	100	100	150
	120	120	130
Polystyrol-Hartschaumplatte, expandiert EPS (unbehandelt)	20	20	125
	40	40	63
	60	60	42
	80	80	31
	100	100	25
	120	120	21
Steinwolle	12	10	40
	22	20	40
	27	25	30
	32	30	50
	42	40	50
	52	50	50
	62	60	50
	72	70	50
Weichfaserplatte	15	13	150

3.2 Einschalige Konstruktionen

Bei einschaligen Konstruktionen spielt die Eigenfrequenz des Bauteils eine entscheidende Rolle, wenn die einfallende Luftschallwelle mit der Eigenfrequenz des Bauteils übereinstimmt. In diesem Zusammenhang ist der Begriff der Biegesteifigkeit von Bedeutung. Biegeweiche Bauteile sind definiert durch die Lage der Grenzfrequenz (Koinzidenzgrenzfrequenz). Weist ein Bauteil eine Grenzfrequenz (Gleichung 44) auf, die oberhalb von 1.500 Hz liegt, spricht man von „biegeweich“. Abbildung 10 in Abschnitt 2.2.2.2.2. zeigt Grenzfrequenzen von Platten aus verschiedenen Baustoffen in Abhängigkeit ihrer Dicke.

Der Koinzidenzeffekt ist im baulichen Schallschutz wichtig und wird hier kurz beschrieben.

Wenn eine Luftschallwelle und die zugehörige Biegewelle an der Wand parallel und mit gleicher Geschwindigkeit entlanglaufen (Koinzidenz), tritt eine Verstärkung der Biegewelle ein, was sich auf der anderen Wandseite durch ebenfalls verstärkte Schallabstrahlung bemerkbar macht: die Schalldämmung beginnt abzusinken. Für die Biegewelle geschieht dies nur dann, wenn Frequenz und Plattendicke dafür die richtigen Werte haben.

Die zugehörige Frequenz ist die sogenannte "Koinzidenzgrenzfrequenz f_G", bei welcher die Schalldämmungsverschlechterung beginnt. Bei Luftschall-Schrägeinfall läuft die sogenannte "Wellenspur" des Luftschalls an der Wand entlang, daher "Spuranpassungseffekt". Die Wellenspur ist naturgemäß stets schneller als die Luftschall-Ausbreitungsgeschwindigkeit.

Bei 45° Einfallswinkel, der statistisch und leicht einsichtig etwa am häufigsten vorkommt, läuft die Luftschall-Wellenspur mit der 1,41-fachen Luftschall-Ausbreitungsgeschwindigkeit an der Wand entlang. Damit die Biegewelle gleich schnell ist, muss sie gemäß Obigem eine höhere Frequenz haben, und zwar die doppelte Frequenz. Bei dieser doppelten Koinzidenzgrenzfrequenz ist der Schalldämmungseinbruch bereits maximal, dank den statistisch sehr zahlreichen Schallstrahlen bei diesem und den benachbarten Einfallswinkeln.
Der Koinzidenzeffekt bildet eine Grenze (Koinzidenzgrenzfrequenz f_G) für die universelle Wirksamkeit des Berger'schen Massengesetzes (siehe Abschnitt 12.1.1, Gl. 67), bei welcher ein starker Einbruch der Schalldämmung beginnt. Die größte Tiefe des Einbruchs liegt also ca. bei der 2-fachen Koinzidenzgrenzfrequenz. Gegen noch höhere Frequenzen zu steigt die Luftschalldämmung dann rasch wieder an und folgt ab der ca. dreifachen Koinzidenzgrenzfrequenz wiederum dem Massengesetz. Damit können nachstehende Folgerungen abgeleitet werden.
Der starke Einbruch der Schalldämmung darf nicht in den bauakustisch relevanten Frequenzbereich hereinreichen. Er muss mit seiner Koinzidenzgrenzfrequenz, bei welcher der starke Abfall beginnt, an der oberen Frequenzgrenze, nämlich bei 3.150 Hz, gehalten werden.
Dies gelingt durch dünneres (= biegeweicheres) Plattenmaterial (siehe Abb. 10). Das Material muss also dünn genug, d. h. "biegeweich" bleiben, darf daher nicht einschalig dicker werden. Mit zunehmender Dicke wandert der Koinzidenzeinbruch hinunter zu tieferen Frequenzen, d. h. in den bauakustisch relevanten Frequenzbereich hinein, wodurch das bewertete Schalldämmmaß R_w sich bedeutend verschlechtert.
Dieses Wandern zu tieferen Frequenzen erfolgt nach dem einfachen Zusammenhang:

Doppelte Einfachschalendicke ergibt Halbierung der Koinzidenzgrenzfrequenz

Das muss vermieden werden. Wenn größere Dicken erforderlich sind, müssen Mehrfachbeplankungen mit geringeren Einzeldicken vorgesehen werden, wodurch die erforderliche "Biegeweichheit", d. h. die zugehörige ausreichend hoch gelegte Koinzidenzgrenzfrequenz hochliegend erhalten bleibt. Die Flächenmasse *m'* aber erhöht sich und damit auch die Schalldämmung.

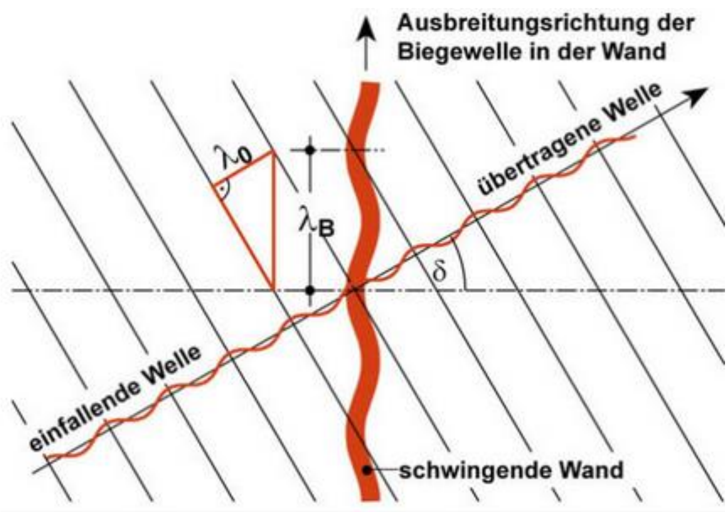


Abb. 11: Darstellung der Koinzidenz oder Spuranpassung einer einfallenden Welle auf ein massives Bauteil.

4 Absorption

In der Bauakustik ist der Schallpegel der über ein trennendes Bauteil übertragen wird von der in dem Raum in welchem der Schallpegel gemessen wird, vorhandenen Schallabsorption abhängig. Es ist deshalb wichtig, dass auch in der Bauakustik die Schallabsorption berücksichtig wird.

In der Abbildung 12 ist die Aufteilung der einfallenden Schallleistung an einer Grenzfläche (z.B. Wand) grafisch dargestellt. Die Leistungen W_{dis}, W_2 und W_3 aus Abbildung 12 werden zu einer einzigen Schallleistung W_{abs} zusammengefasst, die aus Sicht der Schallquelle (Sender) nicht zurückreflektiert wird. Der Absorptionsgrad α beschreibt, wieviel von der Schallleistung von einer Grenzfläche absorbiert wird.

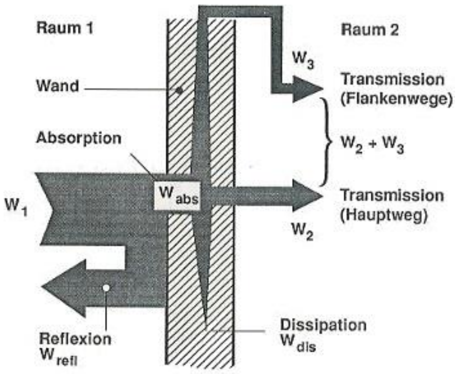


Abb. 12: Aufteilung der einfallenden Schallleistung an einer Grenzfläche (z.B. Wand).

Definition des Schallabsorptionsgrades: $$\alpha = \frac{W_{abs}}{W_1} \qquad (47)$$

mit:

W_1 – ausgestrahlte Schallleistung (Schallquelle)

W_{abs} – absorbierte Schallleistung

Der Rest der Schallleistung wird reflektiert. Es gilt also: $\alpha + \rho = 1$, bzw. $\rho = 1 - \alpha$ (48)

mit

α Schallabsorptionsgrad [-]

ρ Schallreflexionsgrad [-]

Der **Reflexionsgrad** lässt sich auch durch das Verhältnis der Amplituden des Schalldruckes der reflektierten (p_r) und der auftreffenden Welle, dem i. Allg. komplexen **Reflexionsfaktor *r***, ausdrücken.

Der Betrag des Reflexionsfaktors |*r*| gibt die Amplitude der reflektierten Welle, bezogen auf die Amplitude der einfallenden Welle, an; ein Betrag des Reflexionsfaktors von |*r*| = 1 bedeutet also vollständige Reflexion, ein Betrag des Reflexionsfaktors von |*r*| = 0 dagegen vollständige Absorption der einfallenden Welle.

Die Phase des Reflexionsfaktors entspricht dem Phasensprung, den die reflektierte Welle an der Oberfläche erfährt.

Der Reflexionsfaktor ist definiert als: $$r = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \qquad (49)$$

Dabei ist Z_1 das Medium, aus dem die Welle kommt und Z_2 das Medium, in das die Welle eindringt. Z ist der sogenannte Wellenwiderstand des Materials, auch Wellenimpedanz genannt und ist mit

$$Z = \frac{p_{max}}{v_{max}} = \rho\, c_0 \qquad (50)$$

abhängig von den materialspezifischen Eigenschaften Rohdichte ρ und Schallgeschwindigkeit c_0.

In der Akustik entspricht die Wellenimpedanz der Schallkennimpedanz und für Luft beträgt sie ca. 440 [N s/m³].

Anmerkung:
Die "Grade" (z.B. Absorptionsgrad) beziehen sich auf Energien und Intensitäten und können Werte zwischen 0 und +1 annehmen, der Faktor *r* bezieht sich auf Amplituden und liegt zwischen +1 und -1.

4.1 Äquivalente Schallabsorptionsfläche

Als Angabe über die benötigte Absorption in einem Raum, um beispielsweise die gewünschte Nachhallzeit zu erreichen, hat sich die äquivalente Schallabsorptionsfläche *A* eingebürgert.
Das ist die Fläche des Absorbers multipliziert mit der dimensionslosen Größe des Absorptionsgrades.
Es ergibt sich so die Fläche, die ein Absorber mit einem Absorptionsgrad von 1 haben muss, um dem umliegenden Schallfeld genauso viel Schallenergie zu entziehen, wie der oder die eigentlich benötigten Absorber.

Die äquivalente Schallabsorptionsfläche *A* berechnet sich nach folgender Gleichung:

$$A = \alpha_1 S_1 + \alpha_2 S_2 + \cdots = \sum_i \alpha_i S_i \qquad (51)$$

mit:

A	Äquivalente Schallabsorptionsfläche in [m²]
α_i	Schallabsorptionsgrad der i-ten Oberfläche in [m²]
S_i	Fläche der schallabsorbierenden i-ten Oberfläche in [m²]

Üblicherweise ist die Absorption in einem Raum auf den Flächen (der Anzahl *N*) uneinheitlich verteilt, z.B. gemäß der Verteilung α_i auf den Flächen S_i.
Das Absorptionsvermögen eines Raumes wird erst dann vollständig beschrieben, wenn auch Einrichtungsgegenstände, Absorber-Elemente und Personen (ΣA_j) sowie bei großen Räumen die Absorption in Luft (A_L) Berücksichtigung finden.
Damit wird die gesamte äquivalente Schallabsorptionsfläche in einem Raum:

$$A = \sum_{i=1}^{n} (S_i \alpha_i) + \sum A_j + A_L. \qquad (52)$$

Die äquivalente Absorptionsfläche für die Luftabsorption ergibt sich aus

$$A_L = 4m\,V \ \text{[m²]} \qquad (53)$$

Dabei ist
m der Leistungs-Dämpfungskoeffizient in Luft, in Neper je Meter;
V das Volumen des leeren Raumes, in Kubikmeter;

Die Schalldämpfung durch Luftübertragung ist eine Funktion der Temperatur, der Luftfeuchte und der Frequenz. Für die Schallübertragung in Räumen enthält Tabelle 5 die entsprechenden Werte für übliche Bedingungen (ISO 9613-1). Übliche Bedingungen in der Raumakustik sind für die Lufttemperatur 20 °C und eine Luftfeuchte von 50 % bis 70 %.

Tabelle 5: Dämpfungskoeffizient *m* in Oktavbändern in Abhängigkeit von Temperatur und Luftfeuchte

	m in 10^{-3} Neper je Meter, für Oktavbänder mit Mittenfrequenz in Hz						
	125	250	500	1000	2000	4000	8000
20 °C, 50 % bis 70 % Luftfeucht	0,1	0,3	0,6	1,0	1,7	4,1	13,5

Achtung

Der Dämpfungskoeffizient *m* wird in 10^{-3} Neper je Meter angegeben! Multipliziert man ihn mit dem Raumvolumen erkennt man, dass nur große Volumina zu einem spürbaren Beitrag zur Schallabsorption beitragen.

In Abbildung 13 ist die äquivalente Schallabsorptionsfläche für die Luftabsorption A_L für verschiedene Volumen grafisch dargestellt.

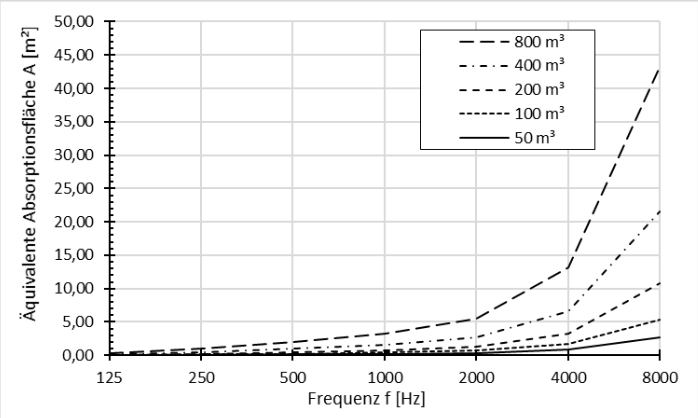


Abb. 13: Äquivalente Schallabsorptionsfläche A_L in m² für die Luftabsorption für verschiedene Raumvolumen *V* in m³ in Abhängigkeit der Frequenz *f* in Hz

4.2 Nachhallzeit

Die Nachhallzeit (*T*) ist ein Maß für den Nachhall in einem Raum und gleich der Zeit, die benötigt wird für einen Ton der um 60 dB abfällt, nachdem der Ton abbricht.

Die Abklinggeschwindigkeit hängt von der Größe der Schallabsorption in dem Raum, der Raumgeometrie und der Frequenz des Tons ab. *T* wird in Sekunden angegeben.

Dieses Abklingen wird üblicherweise über die ersten 10, 20 oder 30 dB gemessen und dann auf den vollen Bereich von 60 dB extrapoliert.

Die frequenzabhängige Nachhallzeit eines Raums wird für die Mittenfrequenz eines Terzfilters mit der Frequenz von 500 Hz oder 1 kHz angegeben oder als frequenzabhängige Kurve der Abhängigkeit der Nachhallzeit von der Frequenz, was aber keinen Frequenzgang des Nachhalls darstellt.

Wichtig ist die Tatsache, dass die Nachhallzeit und der Absorptionsgrad frequenzabhängige Werte sind.

Die Berechnung sollte also am besten in Terz- oder Oktavbändern erfolgen. Wallace C. Sabine (1868 – 1919) entwickelte 1898 seine Formel zur Berechnung der Nachallzeit (Sabine’sche Nachhallformel) auf empirischem Weg, die später auch theoretisch nachgewiesen wurde und noch heute Gültigkeit hat.

$$T_{60} = \frac{0{,}16\,V}{A}\ [s] \quad (54)$$

mit:

T_{60} Zeit, die benötigt wird, damit die Energie um 60 dB abnimmt in s

V Raumvolumen in m³

A Äquivalente Schallabsorptionsfläche des Raumes in m²

<u>Anmerkung</u>
Diese Rechnung muss als Näherung verstanden werden, um den Bedarf an Schallabsorbern abzuschätzen. In der Realität spielt auch die Positionierung der Elemente eine Rolle. Durch wellentheoretische Phänomene (diffuses Schallfeld, Raummoden) ist vor allem bei tiefen Frequenzen die Position der oft schmalbandig wirkenden Schallabsorber wesentlich.

Schaltet man zum Zeitpunkt $t = 0$ eine Schallquelle im Raum plötzlich ab, so hört das Schallsignal nicht abrupt auf, sondern klingt in einer für den Raum charakteristischen Weise langsam ab. Dieser Vorgang wird Nachhall genannt.
Die Dauer des Abklingvorganges wird mit der Nachhallzeit T angegeben. Sie ist definiert als diejenige Zeit, die benötigt wird, damit der Schalldruckpegel im Raum nach Abschalten der Quelle um 60 dB abfällt (s. Abb. 14).

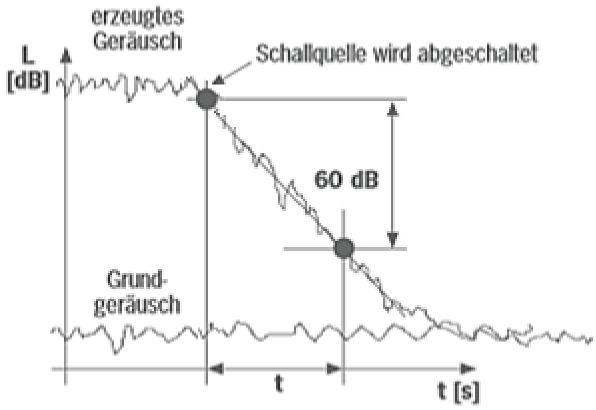


Abb. 14: Schematischer Pegel-Zeit-Verlauf zur Bestimmung der Nachhallzeit. Die Aufzeichnung des Pegelabfalls beginnt zum Zeitpunkt der Abschaltung der Schallquelle.

5 Raumresonanz

Jeder geschlossene Raum weist Eigenfrequenzen, sogenannte Raumresonanzen auf. Wird in einem Raum ein Schalldruckpegel gemessen, so sind diese Raumresonanzen zu beachten.

5.1 Stehende Wellen (Raumeigenmoden)

Die Raumresonanzen, die sich zwischen den Begrenzungsflächen eines Raumes bilden, nennt man "stehende Wellen" oder Raumeigenmoden, auch kurz Moden. Sie entstehen, wenn ein Vielfaches der halben Wellenlänge ($\lambda/2$) zwischen die Begrenzungsflächen eines Raums passt.

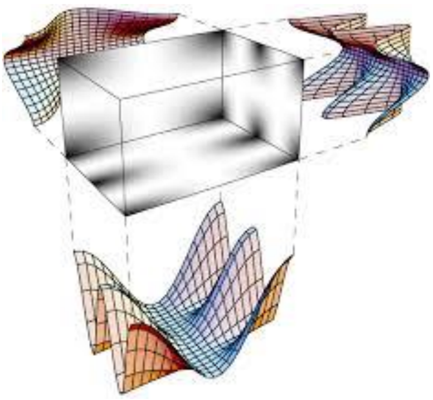


Abb. 15: Prinzipdarstellung der Raumeigenmoden.

Voraussetzung für eine Raummode ist eine stehende Welle.

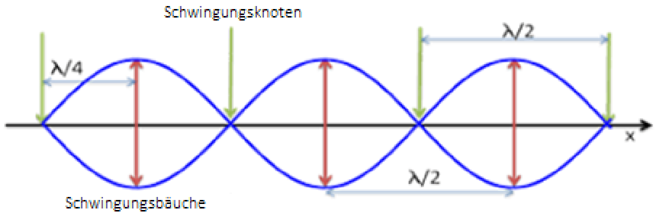


Abb. 16: Prinzipdarstellung der Schallausbreitung und der Schallwellenlänge einer Longitudinalwelle.

Die Raummoden zeigen, wo sich im Raum Schwingungsknoten und Schwingungsbäuche bei bestimmten Eigenfrequenzen ausbilden. Raummoden sind also in geschlossenen Räumen stehende Schallwellen mit einer Eigenfrequenz. Die Schwingung pendelt dabei zwischen zwei gegensätzlichen Auslenkungszuständen hin und her.

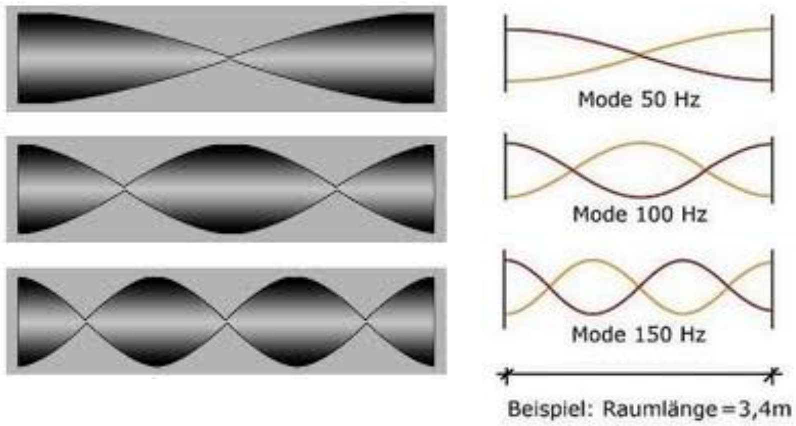


Abb. 17: Prinzipdarstellung der Abbildung einer „stehenden Welle“.

Die nachfolgende Formel beschreibt die Berechnung der Frequenzen, bei der in einem Quaderraum der Länge *L*, der Breite *B* und der Höhe *H*, die Eigenfrequenzen liegen.

$$f_{n,m,k} = \frac{c}{2}\sqrt{\frac{n^2}{L^2} + \frac{m^2}{B^2} + \frac{k^2}{H^2}} \tag{55}$$

mit:

c	Schallgeschwindigkeit in m/s
n, m, k	Ganzzahlige Ordnung der Moden
L, B, H	Länge, Breite, Höhe des Raumes in m

Die tiefste Eigenfrequenz in einem Raum ist daher immer die, deren halbe Wellenlänge der größten Raumabmessung entspricht. Ist die Länge des Raumes die größte Abmessung, dann ist die tiefste Eigenfrequenz die (1,0,0)-Mode ($f_{n,m,k}$ mit $n = 1$, $m = k = 0$).

Wäre die Breite die größte Ausdehnung, dann wäre es die (0,1,0)-Mode ($f_{n,m,k}$ mit n=0, m= 1, k=0).

5.2 Schroeder-Frequenz

Als Halbwertsbreite bezeichnet man den Abstand zwischen den beiden Frequenzen links und rechts einer Resonanz, deren Schallenergie 3 dB unterhalb des Resonanzmaximums liegt.
Für die Halbwertsbreite gilt

$$(\Delta f)_n = \frac{\delta_n}{\pi} \tag{56}$$

Die Halbwertsbreite und damit die Güte der Maxima ist also bei konstanter Dämpfung nicht frequenzabhängig. Das erklärt, warum der Frequenzgang zu hohen Frequenzen hin immer glatter wird: die Halbwertsbreite bleibt gleich, während die Dichte der Resonanzen zunimmt.
Dieses Phänomen führt zum entscheidenden Kriterium für die Unterscheidung zwischen akustisch großen und kleinen Räumen: Es muss eine Grenzfrequenz ermittelt werden, oberhalb derer die Resonanzen so dicht liegen, dass sie sich überlagern, während unterhalb dieser Frequenz jede Resonanz einzeln – im Allgemeinen störend – in Erscheinung tritt.
M. Schröder stellte die Bedingung, dass im Durchschnitt drei Resonanzen in den Bereich der Resonanz-Halbwertsbreite fallen müssten. Dies entspricht der Gleichsetzung von (21) und (56) im Abschnitt 2.2.2.1.2:

$$3\frac{c^3}{4\pi V f^2} = \frac{\delta_n}{\pi}$$

Nach der Frequenz aufgelöst folgt (gerundet): $f = \frac{5400}{\sqrt{V\delta_n}}\mathrm{Hz}$

Die Dämpfung lässt sich auch durch die Nachhallzeit ausdrücken, die im Allgemeinen leichter empirisch zu bestimmen oder durch die Sabine'sche Formel zu berechnen ist: $T = \frac{6{,}9}{\delta_n}$

Durch Einsetzen erhält man die allgemein bekannte Formel für die Schröder-Frequenz (gerundet):

$$f_S = 2000\sqrt{\frac{T}{V}} \tag{57}$$

mit der mittleren Nachhallzeit *T* in s und dem Raumvolumen *V* in m³

Alle diese Betrachtungen über das Wellenfeld beziehen sich auf den Frequenzbereich unterhalb der Großraumfrequenz, wo der Raum als "akustisch klein" angesehen werden kann.
Im Detail besagt diese Gleichung, dass unterhalb der tiefsten Eigenfrequenz eine Schallausbreitung in einem Raum nur noch nach dem Prinzip einer Druckkammer möglich ist.
Trägt man die Eigenfrequenzen über der Frequenzachse auf, dann erkennt man, dass die Dichte mit zunehmender Frequenz immer größer wird, bis einzelne Moden nicht mehr separat zu erkennen sind.
Ist dieser Zustand erreicht, dann kann das akustische Verhalten statistisch beschrieben werden, und es gelten die Regeln der geometrischen Akustik mit Spiegelquellen und Strahlenverfolgung.
Unterhalb des statistischen Frequenzbereiches spricht man vom modalen Bereich, der sich nur mithilfe der Wellenlehre beschreiben lässt.
Der Übergang erfolgt näherungsweise bei eben dieser Frequenz, die als „Schroeder-Frequenz" f_S bezeichnet wird.

Die Schallausbreitung in Räumen lässt sich somit in drei Bereiche unterteilen.

Den statistischen oberhalb der Schroeder-Frequenz, den modalen zwischen der tiefsten Eigenfrequenz eines Raumes und der Schroederfrequenz, sowie dem hier nicht näher betrachteten Bereich unterhalb der tiefsten Eigenfrequenz, wo der Raum als Druckkammer agiert.

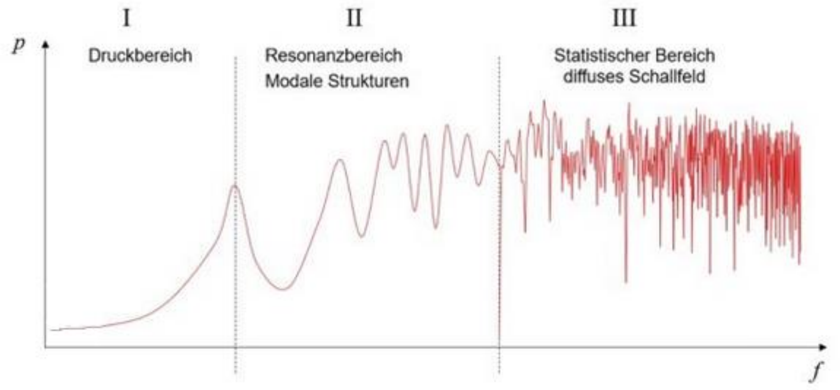


Abb. 18: Schematisierte Verteilung der Moden im Raum über der Frequenzachse

Oberhalb der Grenzfrequenz sind die Raumdimensionen viel größer als die Wellenlänge des Schalls.
Daher gilt das Modell der geometrischen Akustik: Von einer Schallquelle ausgehend breitet sich der Schall strahlenförmig aus und wird dann von den Raumwänden reflektiert.
Bei jeder Reflexion verliert ein Schallstrahl, je nach Beschaffenheit der Wände, einen mehr oder weniger großen Anteil seiner Energie. Mit Hilfe dieser Vorstellung kann man eine Reihe von raumakustischen Kriterien herleiten. Das bekannteste Kriterium ist die Nachhallzeit. Unterhalb der Grenzfrequenz ist das einfache Modell der geometrischen Akustik nicht mehr gültig. Die Phänomene bei tiefen Frequenzen können nur durch die wellentheoretische Akustik beschrieben werden.

5.3 Axiale, tangentialen und oblique Raum-Moden

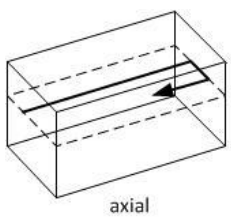
Das Schallfeld wird durch die Raumeigenmoden geprägt. Zu jeder Eigenmode gehört eine unterschiedliche räumliche Schalldruckverteilung. Bewegt man sich in einem Raum, in dem eine Eigenmode angeregt wird, nimmt man stark schwankende Schallintensitäten wahr. Es gibt drei Formen von Raummoden.

Die **axialen, tangentialen** und **obliquen Raum-Moden.**

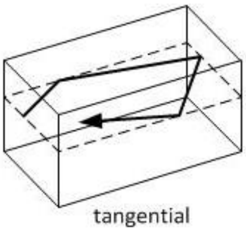
Axiale Raum-Moden treffen auf zwei gegenüberliegende Oberflächen:

$$f_n = \frac{c_0}{2}\,\frac{n}{d} \qquad (58)$$

mit d = Abstand zwischen den Wänden
n = Ordnungszahl der Raummode (n = 1, 2, 3 ….)
c_0 = Schallgeschwindigkeit in Luft

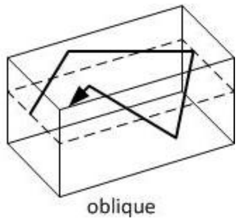


Axial Moden schließen zwei parallele Oberflächen ein – gegenüberliegende Wände oder den Fußboden und die Decke. Das sind die stärksten Moden.
An den Wänden befinden sich immer Schalldruckmaxima (Schalldruckbäuche).



<u>Tangentiale Raum-Moden</u> treffen auf vier Oberflächen:

Tangentiale Raum-Moden haben die halbe Energie der Axial-Moden (–3 dB).
An den Wänden befinden sich immer Schalldruckmaxima (Schalldruckbäuche).



<u>Oblique Raum-Moden</u> schließen sechs Oberflächen über Eck ein:

Oblique Raum-Moden haben ein Viertel der Energie der Axial-Moden (–6 dB).
Oblique Moden sind weniger von Bedeutung.
An den Wänden befinden sich immer Schalldruckmaxima (Schalldruckbäuche).

6 Reflexionswirkung von Flächen

Schallwellen werden reflektiert, wenn sie auf eine Fläche mit abweichender Impedanz zu bisherigen Wellenwiderständen treffen. Reflexionsvorgänge sind abhängig vom Verhältnis der Schallwellenlänge zu den Längs- bzw. Querabmessungen b der reflektierenden Fläche.
Die Reflexionswirkung variiert frequenzabhängig bei Räumen mit Einbauten und Strukturen. Prinzipiell kann in drei mögliche Reflexionsformen unterschieden werden:

- geometrisch gerichtete oder spiegelnde Reflexion an Strukturen ($\lambda < b$)
- ungerichtete diffuse Reflexion ($\lambda \approx b$)
- geometrisch gerichtete oder spiegelnde Reflexion an Grundflächen ($\lambda > b$)

6.1 Geometrisch gerichtete Reflexionen

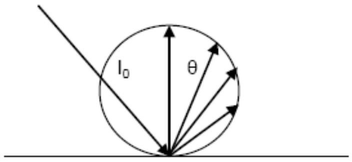
Wenn die Reflexionsfläche groß gegenüber der Wellenlänge ist (Abmessung $b > \lambda$), gilt entsprechend den optischen Gesetzmäßigkeiten: Einfallswinkel = Ausfallswinkel.
Bei spiegelnden Reflexionen an gekrümmten Flächen unterscheidet man zwischen konvex und konkav geformten Oberflächen. Bei ersterem werden die reflektierten Schallstrahlen gestreut und bei letzterem werden sie konzentriert (fokussiert).
Neben der Gefahr störender Schallkonzentrationen können elliptische und parabelförmige Krümmungen von Teilflächen auch zur bewussten Schalllenkung dienen.

6.2 Diffuse Reflexionen (Streuungen)

Als diffuse Reflexionen bezeichnet man die gleichmäßig in alle Raumwinkel verteilten Schallstrahlen.
Diffus streuende Oberflächen werden durch den Diffusitätsgrad (wenn 1 $\Rightarrow$ gleichmäßige Reflexionsverteilung) oder den Streugrad (wenn 1 $\Rightarrow$ in Richtung der spiegelnden Reflexion wird keine Energie reflektiert) beschrieben.
Wenn beide Parameter Null sind, kennzeichnet dies eine geometrisch gerichtete Reflexion.

Oft können diese nur grob abgeschätzt werden. Weicht der Ausfallswinkel der reflektierten Schallstrahlen mehr als ±10° von der geometrisch gerichteten Reflexion ab, bezeichnet man diese Energieanteile als gestreut. Die Schallwellen werden, falls „perfekt diffus“, nach dem Lambert‘schen Gesetz (Wahrscheinlichkeitsverteilung) in alle Raumrichtungen zurückgeworfen.

$I_{str} = I_0 * cos\theta$



Es ergibt sich eine Proportionalität zwischen der Intensität I_{str} des gestreuten Schalls und dem Kosinus des Ausfallswinkels der einfallenden Intensität I_0.
Die Strahldichte der Fläche nimmt mit flacher werdendem Winkel ab und ist unabhängig vom Einfallswinkel.
Mit Hilfe der Helmholtz-Zahl *He* kann die Art der Schallausbreitung bestimmt werden. Sie ist eine dimensionslose Größe für das Verhältnis zweier Längen, der charakteristischen geometrischen Abmessung eines Hindernisses *L* zur Wellenlänge *λ* des Luftschalls.

$$He = \frac{L}{\lambda}$$

He >>1	große Körper, *p* und *v* in Phase (Ebene Welle)	⇒	Reflexion
He ≈ 1	Körperabmessungen entsprechen Schallwellenlänge	⇒	Streuung
He <<1	kleine Körper *p* und *v* nicht in Phase	⇒	Beugung

Für hohe Frequenzen ist das Verhältnis zwischen Hindernisabmessung und Wellenlänge meist groß. Hinter dem Störkörper bildet sich eine Schattenzone aus. Wenn das Verhältnis sinkt, kommt es zunehmend zu diffusen Reflexionserscheinungen (s. Tabelle 6), welche bei *He* ≈ 1 besonders ausgeprägt sind. Streukörper vermindern die mittlere freie Weglänge im Raum. Bei tiefen Frequenzen ist das Verhältnis meist klein.
Die Schallwellen werden in die Schattenzone hinter dem Körper gebeugt

Tabelle 6: Mindestmaße (λ/2) für die streuende Wirkung von Strukturen

Oktavband-Mittenfrequenz [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000
Wellenlänge [m]	2,72	1,36	0,68	0,34	0,17	0,08
Mindestmaße von Strukturen [m]	1,35	0,70	0,35	0,17	0,09	0,04

6.3 Diffusoren

Sowohl die rein-spiegelnde als auch die rein-diffuse Reflexion stellen Grenzfälle dar. Zum einen ist es wichtig bei der raumakustischen Planung Hörerplätze ausreichend durch gerichtete Reflexionen mit Schallenergie zu versorgen, zum anderen sollen konzentrierte und energiereiche späte Reflexionen (Echos) vermieden werden. Diffuse Reflexionen werden durch vorgesetzte Strukturen erreicht, die aufgrund ihrer hohen Masse reflektierend wirken. Zur Reflexion von Sprache genügen 10 kg/m². Mit sinkender Frequenz steigt die nötige flächenbezogene Masse. Durch Diffusoren verteilt sich idealerweise die zurückgeworfene Energie gleichmäßig auf alle Richtungen. Somit kann den Raummoden in kleinen Räumen entgegengewirkt werden.
Ein örtlich inhomogenes Reflexionsverhalten kann durch Phasenverschiebungen in der Reflexion erreicht werden. Dies kann durch verschiedene Impedanzen oder durch geometrische Formen realisiert werden.

7 Schallpegel

Der Schallpegel ist das logarithmierte Verhältnis des Effektivwertes (p_{eff}) oder Spitzenwertes ($\hat{p}$) einer Schallfeldgröße (z.B. Schalldruck *p*) oder Schallenergiegröße (z.B. Schallleistung *P*) zur entsprechenden Bezugsgröße in Dezibel (dB).

7.1 Schalldruckpegel

Neben der Frequenz *f* ist der Schalldruck $\hat{p}$ eine wichtige Kenngröße von Schallschwingungen. Er stellt die Amplitude der Schwingung dar und ist im Vergleich zu dem statischen atmosphärischen Druck (Ruhedruck) von etwa 100 kPa ein sehr kleiner Wechseldruck in der Größenordnung von 20 µPa (Hörschwelle) bis 20 Pa (Schmerzgrenze), der diesen überlagert.

Die Wahrnehmungs- und Schmerzgrenzen sind frequenzabhängig (tieffrequente Schallvorgänge erfordern z. B. zu ihrer Wahrnehmung größere Schalldrücke als hochfrequente) und individuell sehr unterschiedlich.

Der Schalldruckpegel ist ein logarithmischer Bezugswert, der für einen gegebenen Schalldruck *p* berechnet wird. Dabei wird die Feldgröße Schalldruck quadratisch ins Verhältnis gesetzt:

Schalldruckpegel: $$L_p = 10\,log\frac{p_{eff}^2}{p_0^2} = 20\,log\frac{p_{eff}}{p_0} \quad \text{(dB)} \qquad (59)$$

mit

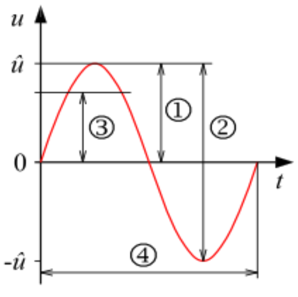
p_{eff}	Effektivwert des Schalldrucks in Pa = Pascal	Anmerkung: $p_{eff} = \frac{\hat{p}}{\sqrt{2}}$
p_0	Bezugswert des Schalldrucks in Pa = Pascal	Anmerkung: p_0 = 0,00002 Pa = $2{\cdot}10^{-5}$ Pa

Der Schalldruckpegel L_p (Formelzeichen *L* von engl. level: „Pegel“ mit Index *p* von engl. pressure: „Druck“) wird häufig nur als Schallpegel angegeben. Der Schalldruck wird mit Mikrofonen gemessen und häufig mit einer Frequenzbewertung, nämlich der A-Bewertung, in dB(A) angegeben.

Exkurs:

Unter dem Effektivwert wird in der Elektrotechnik der quadratische Mittelwert einer zeitlich veränderlichen physikalischen Größe verstanden.

Der Effektivwert hängt sowohl vom Scheitelwert (Spitzenwert, Amplitude) als auch von der Kurvenform ab. In der englischen Sprache wird der Effektivwert mit *RMS* (Abkürzung für Root Mean Square, Quadratisches Mittel) bezeichnet.



Sinusförmige Wechselspannung *u*
1 = Scheitelwert, Amplitude $\hat{u}$
2 = Spitze-Tal-Wert (Höhe der Auslenkung vom niedrigsten bis zum höchsten Wert)
3 = Effektivwert u_{eff},
4 = Periodendauer *t*

Abb. 19: Schematische Darstellung einer sinusförmigen Wechselspannung

7.2 Schall-Leistungspegel

Die Schallleistung einer Schallquelle ist eine akustische Größe. Sie bezeichnet die pro Zeiteinheit von einer Schallquelle abgegebene Schallenergie. Sie ist eine der Schallenergiegrößen und ist eine mechanische Leistung. Ihre Einheit ist Watt (W).

Die zugehörige logarithmische Größe ist der Schallleistungspegel der sich als Energiegröße direkt mit dem Bezugswert ins Verhältnis gesetzt berechnen lässt:

Schall-Leistungspegel: $L_W = 10 \cdot log \frac{P}{P_0}$ (dB) (60)

mit

P Schallleistung in W

P_0 Bezugswert der Schallleistung Anmerkung: $P_0 = 10^{-12}$ W

Die Schallleistung beschreibt die Quellstärke eines Schallerzeugers und nicht das Schallfeld. Unter Vernachlässigung von Dämpfungen innerhalb des umgebenden Mediums muss also durch jede geschlossene Hüllfläche um die Schallquelle die gleiche Schallenergie treten, unabhängig von ihrer Form und Entfernung zur Schallquelle.
In der Emissionsmessung ist diese eine wichtige Schallenergiegröße zur Bewertung einer Schallquelle, da die Schallleistung einer Schallquelle im Gegensatz zum Schalldruck, der Schallschnelle und der Schallintensität unabhängig vom Ort der Quelle bzw. des Empfängers ist.
Die Schallimmission an einem Empfangsort kann aus der Schallleistung berechnet werden, wenn die Schallleistung der an diesem Ort relevanten Schallquellen, deren Abstand vom Empfangsort und deren Abstrahlcharakteristik bekannt sind. So ist es bei Kenntnis der Schallleistungen der Einzelkomponenten z. B. möglich, die Lärmbelastung des Bedienpersonals einer Maschine oder Anlage schon vor deren Fertigstellung zu bestimmen und eventuell nötige Lärmschutzmaßnahmen einzuleiten.

7.3 Mittelungspegel

Der Mittelungspegel ist eine Mess- und Berechnungsgröße und dient zur Kennzeichnung von zeitlich schwankenden Geräuschen. Dieser Pegel wird für Geräuschereignisse eingesetzt, die sich aus ständig verändernden Teilgeräuschen unterschiedlicher Lautstärke zusammensetzen. Bei zeitlich schwankenden Schallpegelwerten wird der Mittelungspegel (energieäquivalenter Dauerschallpegel) über eine Mittelwertbildung der gemessenen Schallintensitäten bestimmt. Der Mittelungspegel L_m ist so groß wie der A-bewertete Schallpegel eines gleichbleibenden Geräusches gleicher Frequenzzusammensetzung, welches am Messort die gleiche Schallenergie liefert wie das zeitlich schwankende Geräusch. Der Mittelungspegel L_m entspricht also dem Pegel eines gleichbleibenden Dauergeräusches mit der gleichen Störwirkung wie das zeitlich veränderliche Geräusch. Daher der Begriff: „*energieäquivalenter Dauerschallpegel,* L_{eq}".
Zur Ableitung von L_m bzw. L_{eq} wird die Messzeit T in n Abschnitte t_1, t_2, ...t_n unterteilt.
Bei der Berechnung des Mittelungspegels wird über die Schallenergie, die in diesem Fall proportional zur Schallintensität ist, und nicht über den Schallpegel gemittelt. Dies hat zur Folge, dass hohe Schallpegel bei der Mittelung stärker bewertet werden.

$$L_m = 10 \cdot \lg\left(\frac{1}{T} \cdot \int_0^T 10^{0,1 \cdot L(t)}\,dt\right) \quad \text{oder} \quad L_m = 10 \cdot \lg\left(\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^{N} 10^{0,1 \cdot L_i}\right) \qquad (61)$$

L_m Mittelungspegel

T betrachtetes Zeitintervall (Beurteilungszeitraum)

$L(t)$ Schallpegel in Abhängigkeit zur Zeit t

N Anzahl der gemessenen Schallpegel L_i (mit $1 \leq i \leq N$)

7.4 Beurteilungspegel

Mit dem Beurteilungspegel sollen subjektive Bewertungen von unterschiedlichen Arten der Geräuschbelastung berücksichtigt werden. Der Beurteilungspegel wird in der Regel aus einem Mittelungspegel für die Beurteilungszeit und gegebenenfalls Zuschlägen für Impulshaftigkeit, Tonhaltigkeit und Ruhezeiten gebildet.
Der Beurteilungspegel kann zum Vergleich mit den Immissionsrichtwerten herangezogen werden oder, falls eine arbeitsplatzbezogene Beurteilung erfolgen soll wird der Beurteilungspegel als arbeitsplatzbezogener Mittelungspegel während einer Arbeitsschicht mit Berücksichtigung von ggf. zusätzlichen Spitzenbelastungen (Peaks) verwendet. Der Beurteilungspegel ist nicht unmittelbar messtechnisch zu bestimmen und bezieht sich auf abgegrenzte Zeiträume, z. B. eine achtstündige Arbeitsschicht, die Tageszeit von 6 Uhr bis 22 Uhr (16 Stunden) oder die Nachtzeit von 22 Uhr bis 6 Uhr (8 Stunden bzw. lauteste Stunde).

8 Nahfeld, Fernfeld, Diffusfeld

Bei der Schallausbreitung in Räumen bilden sich ein freies Schallfeld (Direktfeld) und ein diffuses Schallfeld aus. Das Direktfeld entsteht in der Nähe der Quelle, wenn keine Störungen durch reflektierende Flächen, z. B. Wände, auftreten. Ein diffuses Schallfeld bildet sich vor allem in Räumen mit wenig Absorption und in größerer Entfernung zur Quelle aus.
Bei der Ausbreitung einer Schallwelle werden also mit dem Nahfeld und dem Fernfeld zwei Entfernungsbereiche von der Signalquelle mit sehr unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften unterschieden.
Nahfeld und Fernfeld einer Schallquelle sind nur im Zusammenhang mit dem Verhältnis des Abstandes r des Aufpunktes von der Schallquelle zur Wellenlänge λ der Schallsignale zu sehen.

Im Fernfeld gilt: $r > \lambda$.
Im Nahfeld gilt: $r < \lambda$.

Nahfeldverhältnisse sind gekennzeichnet durch einen hohen Anteil akustischer Blindleistung und eine nur geringe Wirkschallleistung bzw. Intensität im Quellbereich. Ursache ist für $r << \lambda$ eine Phasenverschiebung zwischen Druck und Schnelle von 90°. Dem Nahfeld folgt das freie Schallfeld (Direktschallfeld), in welchem der Schalldruckpegel infolge $\tilde{p}^2 \sim \tilde{r}^{-2}$ mit 6 dB pro Entfernungsverdoppelung abnimmt.

Ein Schallfeld in einem Raum heißt "diffus", wenn sich der Schall in alle Richtungen gleichmäßig ohne Vorzugsrichtung ausbreitet (isotrop). Das diffuse Feld, auch Hallfeld genannt, ist ein Modellschallfeld wie das der ebenen Welle und der Kugelwelle, welches aber bei Gültigkeit idealisierender Annahmen eher praxisbezogene Rechnungen erlaubt. Diffuse Schallfelder kommen in Räumen mit hinreichend reflektierenden Raumbegrenzungsflächen vor. Man geht davon aus, dass in jedem Raumpunkt alle Schallausbreitungsrichtungen gleichermaßen am Energietransport beteiligt sind.
Diffuse Schallfelder entstehen immer dann, wenn durch die in einen Raum eingespeisten Schallsignale (Frequenzgemisch) ausreichend viele Eigenmoden des Raumes angeregt werden. Sie bieten gute Voraussetzungen für akustische Präzisionsmessungen (Hallräume).
In einem diffusen Schallfeld trifft also der Schall in jedem Raumpunkt aus allen Richtungen gleich wahrscheinlich mit gleicher Intensität ein. Die Gesamtintensität an einem beliebigen Punkt ist daher null. Voraussetzung für ein diffuses Schallfeld ist eine Durchmischung des Stehwellenmusters eines Raumes durch

- Anregung möglichst vieler Eigenfrequenzen (d. h. es muss ein Frequenzgemisch vorhanden sein) und
- Mehrfachreflexionen und Streuungen an Begrenzungsflächen

Die Grenzfrequenz, oberhalb welcher sich ein diffuses Schallfeld ausbilden kann, hängt vom Volumen des Raumes *V* und dessen Nachhallzeit *T* ab und wird als Schröder-Frequenz f_s bezeichnet (siehe Abschnitt 5.2). Unterhalb der Schröder-Frequenz dominieren die Eigenmoden des Raumes und es kann kein diffuses Schallfeld angenommen werden. Die Schallausbreitung wird in diesem Frequenzbereich durch ein wellentheoretisches Modell beschrieben, mit welchem sich die Stehwellen des Raumes berechnen und entsprechend verringern lassen. Das ist vor allem bei Räumen mit kleinem Volumen bis 500 m³ notwendig. Für größere Räume liegt der in der Raumakustik interessierende Frequenzbereich (63 Hz – 4.000 Hz) oft oberhalb der Schröderfrequenz. Diese beträgt für große Räume etwa 20 Hz – 30 Hz. Oberhalb der Schröderfrequenz kann zum Modell der geometrischen Akustik übergegangen werden. Hierbei wird die Schallausbreitung als Ausbreitung von geradlinigen Schallstrahlen betrachtet.

8.1 Schallpegel im Diffusfeld

Ein diffuses Schallfeld, kurz "Diffusfeld" entsteht vor allem in halligen Räumen (im Idealfall ein Hallraum), in welchen der Direktschall zusätzlich um viele Reflexionen an den Wänden erweitert wird. In einem idealen Diffusfeld ist der Anteil der Energie des Schalls aus allen Richtungen im Mittel gleich groß. In einem Hallraum ist der Schallpegel am Empfänger völlig vom Reflexionsschallfeld bestimmt, so dass der Direktschall keine Rolle spielt. Unter Berücksichtigung der Luftdämpfung ergibt sich der Pegel im diffusen Schallfeld aus

$$L_{diff} = L_W - 10\, log[4\, m\, V - S\, ln(1 - \alpha)] + 6 \text{ dB} \qquad (62)$$

mit

L_{diff}	Pegel im diffusen Schallfeld in dB
L_W	Schallleistungspegel in dB
m	Dämpfungskonstante der Luft nach ISO 9613-1 in m^{-1}
V	Volumen des Raums in m³
S	Fläche der inneren Raumbegrenzungen in m²
$\overline{\alpha}$	über die gesamte Fläche S gemittelter Absorptionsgrad

Dämpfungskonstante der Luft nach ISO 9613-1

	Frequenz (Hz)					
	125	250	500	1.000	2.000	4.000
m (20° 60%)*10³	0,09	0,28	0,64	1,11	2,13	5,89

8.2 Schallpegel im Freifeld

Das Gegenteil eines Diffusfeldes nennt man "Freifeld". Dieses besteht lediglich aus dem Direktschall und weist keine Reflexionen aus anderen Richtungen auf.
Bei einer Kugelwelle nimmt im Direktfeld oder Freifeld der Schallpegel (SPL) mit Verdoppelung des Abstands oder der Entfernung um 6 dB ab.

<u>Merke</u>
Ein Verdopplung des Abstands zwischen Schallquelle und Schallempfänger vermindert den Schallpegel im Freifeld um 6 dB. Eine Halbierung des Abstands führt zu einer Zunahme von 6 dB.

9 Hallradius

Der Hallradius r_H ist in der Akustik in einem geschlossenen Raum diejenige Entfernung von der Schallquelle, bei der die Direktschallenergiedichte (Nahfeld) gleich dem Raumschall im statistischen Schallfeld (Diffusfeld-energiedichte) ist.
Bei stationärer Anregung des Raumes mit einem breitbandigen Signal (z.B. Rauschen) der Schallleistung *P* ergibt sich im diffusen Schallfeld eine konstante (ortsunabhängige) Energiedichte *E.*
Der Hallradius r_H berechnet sich aus den Energiedichten des direkten (E_D) und diffusen (E_R) Schallfeldes wie folgt:

Energiedichte Direktschallfeld: $E_D = \frac{P}{4\pi r^2 c_0}$ (63)

Energiedichte Diffusschallfeld: $E_R = \frac{4P}{c_0\, A}$ (64)

Ist $E_D = E_R$ dann folgt für den Hallradius: $r_H = \sqrt{\frac{A}{16\,\pi}} \approx 0{,}056\sqrt{\frac{V}{T}}$ (65)

mit:

A	Äquivalente Schallabsorptionsfläche in m²
P	Schallleistung in W
T	Nachhallzeit in s
V	Raumvolumen in m³
c_0	Schallgeschwindigkeit in Luft in m/s
r	Abstand (Radius) in m

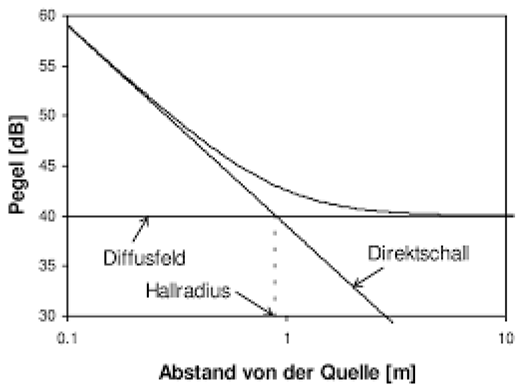


Abb. 20: Schematische Darstellung von Diffus- und Direktschallfeld und Hallradius

Der Hallradius vergrößert sich um den Faktor $\sqrt{2}$, wenn der Sender (Schallquelle) direkt an einer nicht absorbierenden Begrenzungsfläche (Raumkante, Raumecke) steht, weil sich durch Spiegelschallquellen die Energiedichte des nicht diffus reflektierten Schalles in der Nähe des Senders verdoppelt. Bringt man schallabsorbierendes Material innerhalb des Hallradius an, dann ist die Schallabsorption größer als außerhalb davon, weil mehr Schallenergie auffällt. Eine merkbare Schallpegelminderung durch Anbringen von zusätzlichen Schallabsorbern erhält man nur dann, wenn vorher eine sehr geringe Raumabsorption besteht.

10 Lautstärke

Das menschliche Ohr empfindet gleiche Schallpegel verschiedener Frequenzen als unterschiedlich laut. Sehr tiefe und sehr hohe Frequenzen werden weniger laut wahrgenommen als der Frequenzbereich, in dem sich auch unsere Sprache/Kommunikation abspielt. Die physiologische Lautstärkeempfindung beim Hören eines reinen Tons hängt einerseits vom Schallpegel, andererseits von der Frequenz des Tons ab. Es wurde deshalb neben dem physikalischen Maß des Schallpegels (Schalldruckpegel) als zweites Maß die Lautstärke [Phon] eingeführt, die das Lautstärkeempfinden des menschlichen Ohres beschreibt. Bei einem reinen Ton von 1.000 Hz entspricht die Phon-Zahl dem Zahlenwert in dB. Die Lautstärke anderer reiner Töne ist als Zahlenwert des Schallpegels eines 1.000 Hz-Tons festgelegt, der subjektiv als gleich laut empfunden wird. Die Lautstärke, die wir empfinden, ist also neben dem Schalldruck auch von der Frequenz abhängig. In Abbildung 21 sind die frequenzabhängigen Lautstärkepegel den Schalldruckpegel gegenübergestellt.

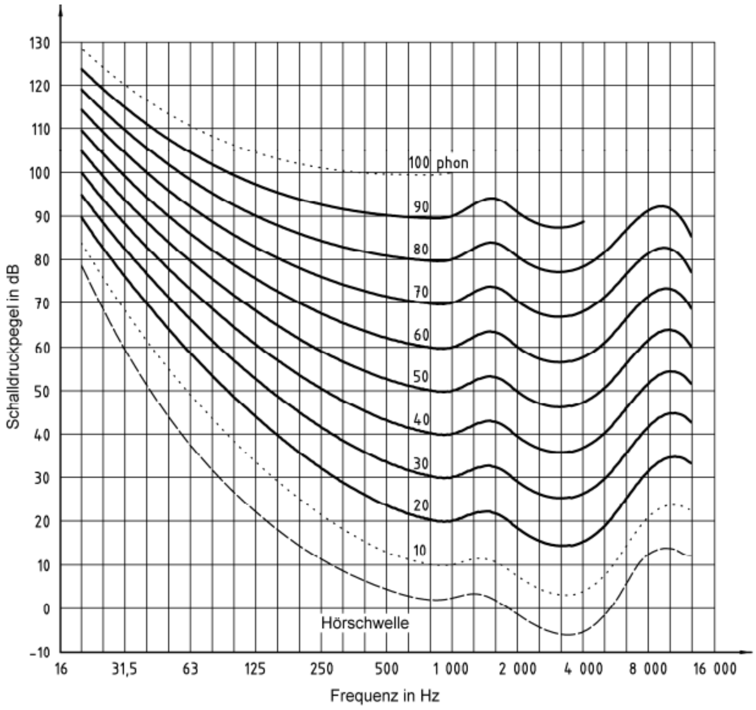


Abb. 21: Normalkurven gleicher Lautstärkepegel für reine Töne bei binauralem (mit beiden Ohren) Hören im freien Schallfeld bei frontalem Schalleinfall nach DIN ISO 226, Bild A1

Die Kurve bei 10 phon ist wegen fehlender experimenteller Daten nur gestrichelt dargestellt. Auch für die Kurve bei 100 phon gibt es nur Daten eines einzigen Instituts.

11 Bewertungskurven

Da das menschliche Ohr Töne mit gleichem Schalldruck in unterschiedlichen Tonhöhen unterschiedlich laut empfindet, werden so genannte Frequenzbewertungskurven verwendet. Bewertete Pegel werden durch den entsprechenden Buchstaben der Frequenzbewertung als Index der Messgröße gekennzeichnet. Der A-bewertete Schalldruckpegel wird mit L_{pA} oder ein Schallleistungspegel mit L_{WA} bezeichnet. Die häufig in der Praxis auftretende Schreibweise dB(A) sollte vermieden werden, da es irrtümlich eine andere Einheit darstellt, was es aber nicht ist. Die Einheit (Hilfseinheit) bleibt das „dB". Nachstehende Grafik zeigt die verschiedenen Bewertungskurven.

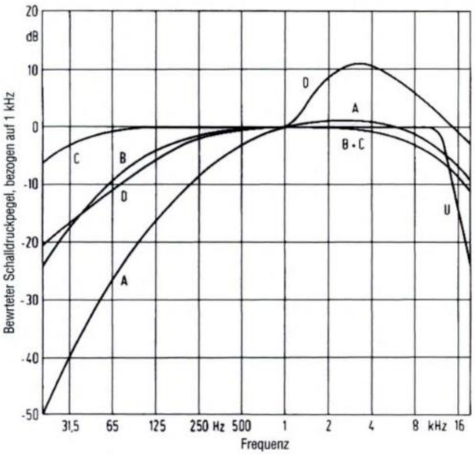


Abb. 22: Frequenzbewertungskurven

In der DIN EN 60651 können die Berechnungsformeln für die A- und C- Bewertung in Abhängigkeit von der Frequenz nachgelesen werden.
Wie man in Abbildung 22 gut erkennen kann, unterscheiden sich die Kurven *A*, *B* und *C* vorwiegend in dem tiefen Frequenzbereich und sollten je nach Pegel des zu bewertenden Signals verwendet werden.
Die A-Bewertung ähnelt den Kurven gleicher Lautstärke bei 40 phon, die B-Bewertung der bei 80 phon und die C-Bewertung entspricht der 100-phon Kurve. Die B-Bewertung hat keine wirkliche Bedeutung mehr. Die D-Bewertung wurde für Fluglärm und die U-Bewertung für das Messen von Hörschall bei gleichzeitigem Auftreten von Ultraschall eingeführt. In der Bauphysik bzw. Bauakustik und im Schallimmissionsschutz sind nur die Bewertungskurven „A" und „C" von Bedeutung.

Die wichtigsten Bewertungsfaktoren sind die sogenannten A-Frequenzbewertungsfaktoren.

Frequenz (Hz)	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
A - Bewertung (dB)	-39,52	-26,21	-16,18	-8,67	-3,25	0,00	1,20	0,96	-1,15	-6,71

Der unbewertete Schallpegel (SPL) wird energetisch mit dem A-Frequenzbewertungsfaktor addiert. Die Addition erfolgt dabei energetisch in jedem Frequenzband nach Gleichung (66).

A-bewerteter Schalldruckpegel ($L_{p,A}$)

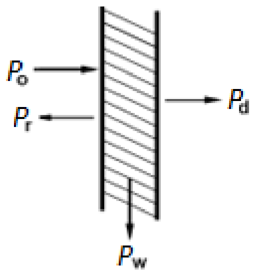
$$L_{p,A} = 10\,lg\left(\sum_i 10^{\left(\frac{L_i+\Delta L_A}{10}\right)}\right) \tag{66}$$

12 Schalldämmung

Die Schalldämmung bildet die Grundlage der Bauakustik und bezeichnet die Behinderung der Ausbreitung von Luft- oder Körperschall.

12.1 Luftschalldämmung

Ein Maß für die Schallübertragung durch ein bestimmtes Bauteil ist der Schalltransmissionsgrad τ.
Er bezeichnet das Verhältnis der übertragenen zur einfallenden Schallleistung. Übliche Werte liegen zwischen 10^{-8} und 10^{-1}. Auch hier wird mithilfe einer logarithmischen Darstellung auf handlichere Werte zurückgegriffen. Kennzeichnung der Luftschalldämmung ist das Schalldämm-Maß *R,* das das logarithmische Verhältnis der Schall-Leistungen auf beiden Seiten der Wand beschreibt. Die Einheit der Schalldämmung ist [dB].
Das Verhältnis der auf der Sendeseite auf eine Wand auftreffenden Schallleistung P_0 mit der durch das Trennbauteil (z.B. Wand oder Decke) übertragenen Leistung P_d bezeichnet den Transmissionsgrad τ.
Das Schalldämm-Maß ist definiert als: $R = -10 \cdot \log \tau$
mit dem Transmissionsgrad $\tau = P_d/P_0$ (67)



P_o: einfallende Schallleistung
P_d: durchgelassene Schallleistung
P_r: reflektierte Schallleistung
P_w: weitergeleitete Schallleistung

Abb. 23: Darstellung der an einer Wand auftretenden Schallleistung ausgehend von einer Schallquelle

In der Praxis werden die einfallende und die durchgelassene Schallleistung allerdings nicht unmittelbar gemessen, sondern die Messung des Schalldämm-Maßes erfolgt zwischen zwei Räumen mit einem indirekten Verfahren. Unter der Annahme, dass auf beiden Seiten der Trennwand ein diffuses Schallfeld anliegt, ergibt sich für die auftreffende Schallleistung:

$$P_S = \frac{\tilde{p}_S^2 \, S}{4 \, \rho \, c} \tag{68}$$

Dabei ist $\tilde{p}_s$ der Effektivwert des Schalldruckes im Senderaum und *S* die Fläche der Trennfläche. Der Nenner in Gleichung (68) stellt die Schall-Kennimpedanz der Luft dar ($Z = \rho\, c$; Schallgeschwindigkeit in Luft *c* und Rohdichte der Luft ρ)
Im eingeschwungenen, stationären Zustand ist die zugeführte Leistung im Empfangsraum gleich der absorbierten Leistung

$$P_E = \frac{\tilde{p}_E^2 \, A}{4 \, \rho \, c} \, , \tag{69}$$

worin *A* die äquivalente Schallabsorptionsfläche des Empfangsraums ist. Setzt man (68) und (69) in (67) ein, so ergibt sich für den Transmissionsgrad τ

$$\tau = \frac{\tilde{p}_E^2 \, A}{\tilde{p}_S^2 \, S} \, . \tag{70}$$

Das Schalldämmmaß R in logarithmischer Darstellung:

$$R = 10 \cdot log\left(\frac{1}{\tau}\right) = L_S - L_E - 10\ log\,\frac{A}{S} \tag{71}$$

mit:

L_S = Senderaum-Schalldruckpegel,

L_E = Empfangsraum-Schalldruckpegel,

S = Trennbauteilfläche,

A = Äquivalente Schallabsorptionsfläche des Empfangsraumes

Für kleine Transmissionsgrade, also geringe Übertragungen, ergeben sich somit große Zahlenwerte für R, was dem besseren Verständnis dient. Unter den Pegeln L_S und L_E versteht man die räumlichen Mittelwerte (Pegel der Schalldruckquadrate im örtlichen Mittel) in den beiden Räume. Um die äquivalente Schallabsorptionsfläche A zu erhalten, wird üblicherweise eine Messung der Nachhallzeit T im Empfangsraum durchgeführt, und mit Hilfe der Sabine'schen Gleichung (siehe Gleichung (54)) bestimmt.

Die Schalldämmmaße R von Bauteilen oder verschiedenen Materialien sind stark frequenzabhängig. Größtenteils steigt die Dämmung zu hohen Frequenzen hin rasch an, weshalb oft nur bis ca. 3−4 kHz gemessen wird. Typische Filter für die Darstellung der Schalldämmung sind Terz- oder Oktavfilter. Als Anregung dient meist ein Rauschen (weißes oder rosa Rauschen) mit der entsprechenden Bandbreite.

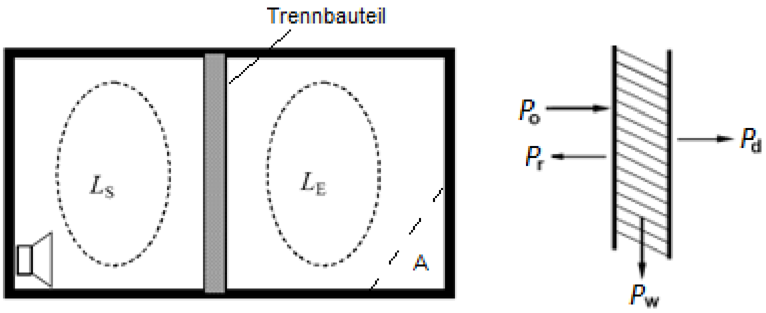


Abb. 24: Schematische Darstellung der räumlichen Situation einer Schalldämmungsmessung

Messungen dieser Art werden in Gebäuden durchgeführt, um festzustellen, ob der gesetzlich vorgeschriebene Mindestschallschutz gewährleistet ist. Andererseits gibt es Labor-Prüfverfahren, die auf ähnlichen messtechnischen Grundlagen stehen und die dazu dienen, die Schalldämmung von Bauteilen oder Baukonstruktionen zu ermitteln.

Die Daten aus Labormessungen bzw. Prüfstandsmessungen können verwendet werden, um bereits bei der Planung von Bauten die schalltechnische Eignung nachzuweisen.

Der wesentliche physikalische Unterschied dieser beiden Betrachtungsweisen liegt in der Tatsache, dass im Prüfstand nur jeweils eine Konstruktion beurteilt wird, dass aber im fertigen Gebäude alle Übertragungswege über alle trennenden und flankierenden Bauteile eine Rolle spielen. Messwerte mit Flankenübertragungen kennzeichnet man dadurch, dass man das Schalldämm-Maß mit einem Apostroph (R' statt R) versieht.

Die Ergebnisse der Schalldämm-Maße werden im Frequenzbereich von 100 Hz – 3.150 Hz in Terzen dargestellt und beurteilt. Diesen Frequenzbereich bezeichnet man auch als „bauakustisch interessierender Frequenzbereich“. Wobei dies historisch gesehen wird und sich auf die Auswertung nach ISO 717 bezieht.

Einfacher und letztlich relevant ist das sog. bewertete Schalldämmmaß R_w (oder R'_w), welches sich durch einen Vergleich der gemessenen Schalldämm-Kurve mit einer international genormten Bezugskurve ergibt.

Für dieses Schalldämm-Maß wird die Bezeichnung: Bewertetes Bau-Schalldämm-Maß verwendet.

12.1.1 Bewertetes Schalldämm-Maß R_w und R'_w

Die Kurve des gemessenen Schalldämm-Maßes R bzw. R' wird mit dem Verlauf einer Bezugskurve verglichen, die vereinfachend den idealen Verlauf (nicht die ideale Größe) der Schalldämmung eines Bauteils unter Berücksichtigung der geringeren Empfindlichkeit des menschlichen Ohres für tiefe Frequenzen darstellt (Abb. 25). Diese Bezugskurve wird nun so weit in Richtung der Ordinate um ganze dB parallel verschoben, bis die mittlere Unterschreitung der Bezugskurve durch die Messkurve nicht mehr als 2 dB beträgt; Überschreitungen dürfen dabei nicht berücksichtigt werden. Aus der Verschiebung der Bezugskurve ergibt sich das bewertete Schalldämm-Maß R_w bzw. R'_w des Bauteils. Der Wert der so verschobenen Bezugskurve wird bei der Frequenz von 500 Hz abgelesen. Die Lage der unverschobenen Bezugskurve entspricht $R_w(R'_w)$ = 52 dB.

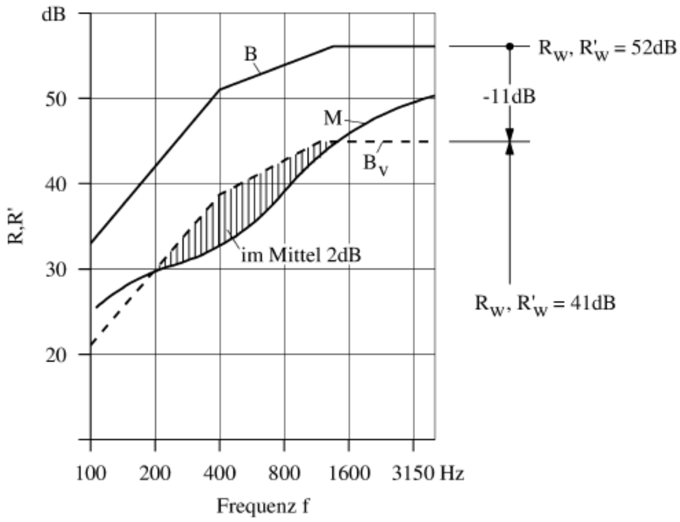


Abb. 25: Ermittlung des bewerteten Schalldämm-Maßes R_w, R'_w durch Verschieben der Bezugskurve B (R_w, R'_w = 52 dB), M Messkurve, Bv verschobene Bezugskurve

Nachstehende Grafik zeigt eine tatsächlich gemessene Schalldämmung über der Frequenz.

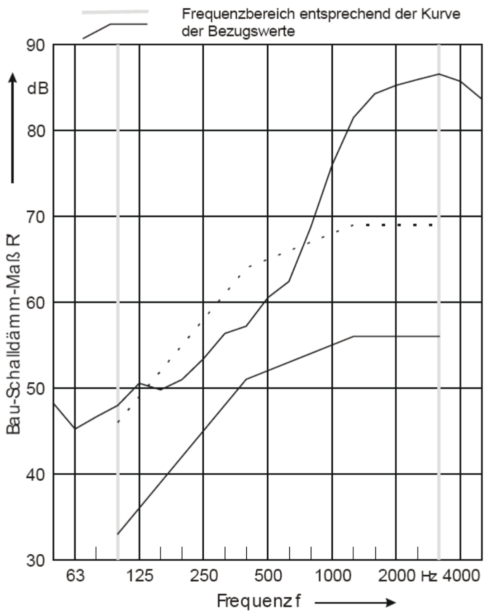


Abb. 26: Formblatt zur Darstellung der Messergebnisse einer Luftschalldämmungsmessung

Berechnung der Schalldämmmaße

a) einschalige Bauelemente

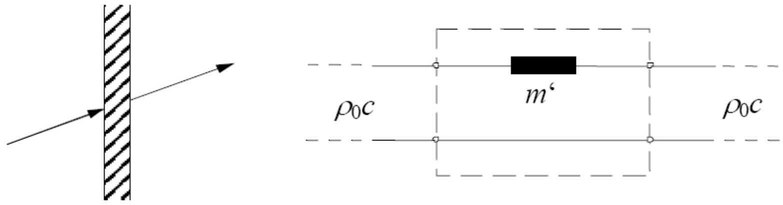


Abb. 27: Die Einfachwand und ihr elektrisches Analogon

$$R = 10\log\left(\frac{p_{\mathrm{ein}}^2}{p_{\mathrm{durch}}^2}\right) = 10\log\left|1+\left(\frac{\omega m'}{2Z_0}\right)^2\right| \approx 20\log\left(\frac{\omega m'}{2Z_0}\right) \tag{72}$$

Dieses sog. „Massegesetz“ gilt für biegeweiche Bauteile, wobei ω die Kreisfrequenz, m' die flächenbezogene Masse und $Z_0 = \rho_0 c_0$ die Kennimpedanz von Luft ist.
Bei Schalleinfall unter dem Winkel ϑ wird das Argument des Logarithmus mit dem Faktor „cos ϑ“ ergänzt.
R steigt um 6 dB pro Oktav (doppelte Frequenz) oder pro Masseverdopplung an.

Die Luftschalldämmung einschaliger, homogener, dichter Bauteile hängt also in erster Linie von ihrer flächenbezogenen Masse m' ab (vgl. Abb. 28).
Die Schalldämmung solcher Bauteile ist umso besser, je größer m' ist.

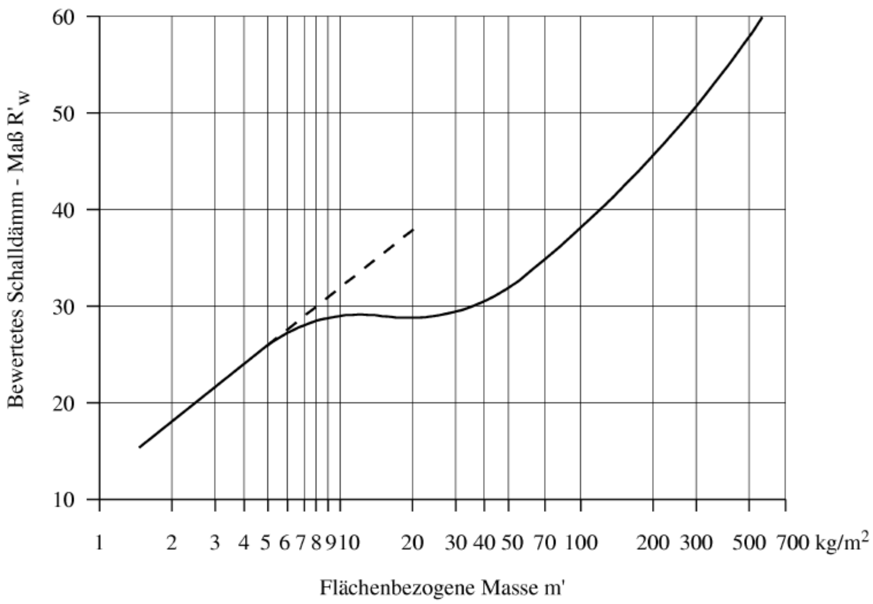


Abb. 28: Bewertetes Schalldämm-Maß R'_w von einschaligen Wänden und Decken in Abhängigkeit von ihrer flächenbezogenen Masse m'; gestrichelt eingezeichnete Gerade gilt für Platten von besonders geringer Biegesteifigkeit, z.B. Stahl- oder Bleiblech, Gummiplatten

Daneben wird aber die Schalldämmung auch noch von der Biegesteifigkeit beeinflusst. Hierbei ist die Lage der Grenzfrequenz f_g entscheidend (vgl. Gl. 44). f_g ist diejenige Frequenz, bei der die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Biegewellen innerhalb des Bauteils mit der Geschwindigkeit übereinstimmt, mit der die „Spur“ der schräg einfallenden Luftschallwelle die Bauteiloberfläche entlang eilt („Spuranpassung“ oder „Koinzidenz“).

b) zweischalige Bauelemente

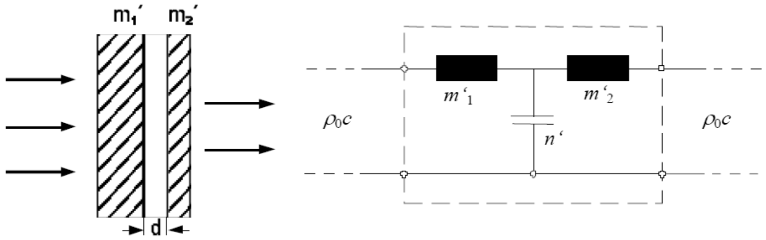


Abb. 29: Die Doppelwand und ihr elektrisches Analogon

Bei zweischaligen Elementen wird das Massegesetz von einem wesentlich stärkeren Effekt überlagert, der auf das Zusammenwirken zweier Masse-Schalen auf einer Luftschicht, die als Feder wirkt, zurückzuführen ist.

$$R = 20\log\left[\frac{\omega^3 d m'_1\, m'_2}{2\rho_o{}^2 c^3}\right], \quad \omega_0 = \sqrt{\frac{m'_1 + m'_2}{n'\, m'_1\, m'_2}} \tag{73}$$

Dabei tritt zwar bei der Resonanzfrequenz ω_0 eine Verschlechterung ein, aber im eigentlichen Nutzbereich steigt das Schalldämmmaß steil (18 dB/Oktav) an, bis die Wellenlänge so klein wird, dass statt der Federwirkung der Luftschicht stehende Wellen im Zwischenraum auftreten. In der Praxis findet man „Doppelwände" bei Haustrennwänden, Leichtbauwänden (z.B. Gipsplatten), im Fertighausbau, bei Fenstern und bei Vorsatzschalen zur Verbesserung der Schalldämmung.
Wichtig sind eine gute Körperschallentkopplung der Schalen (keine Schallbrücken!) und eine geeignete Füllung des Hohlraums mit absorbierendem Material zur Dämpfung des Resonanzeinbruches.

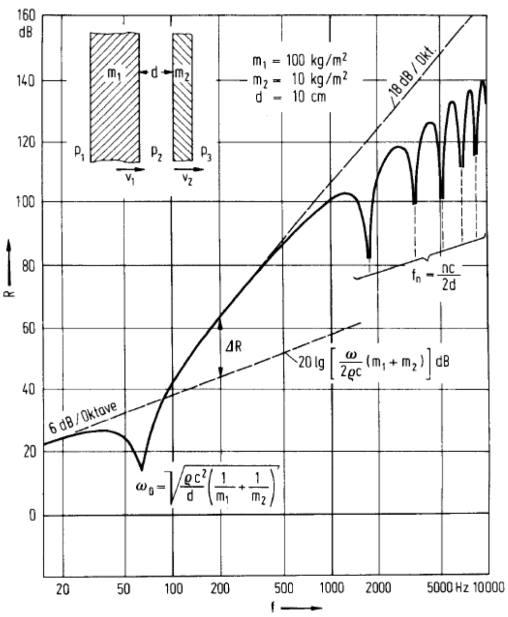


Abb. 30: Schalldämmmaß einer Doppelwand

Vorsatzschalen bewirken also nur dann eine Verbesserung gegenüber dem einschaligen Bauteil, wenn die Resonanzfrequenz f_0 des zweischaligen Systems möglichst tief, d.h. an der unteren Grenze des bauakustisch interessierenden Frequenzbereiches (100 Hz) oder darunter liegt.

12.1.2 Flankenschalldämm-Maß $R_{ij,w}$

Die Flankenschalldämm-Maße über die flankierenden Bauteile R_{Ff}, R_{Df} und R_{Fd} werden entsprechend nach Gleichung (74) berechnet:

$$R_{\mathrm{ij,w}} = \frac{R_{\mathrm{i,w}}}{2} + \frac{R_{\mathrm{j,w}}}{2} + \Delta R_{\mathrm{ij,w}} + K_{\mathrm{ij}} + 10\lg\frac{S_{\mathrm{s}}}{l_0 \cdot l_{\mathrm{f}}}\,(\mathrm{dB}) \tag{74}$$

Berücksichtigt werden die Direktschalldämm-Maße der flankierenden Bauteile $R_{i,w}$ und $R_{j,w}$ je zur Hälfte, das Stoßstellendämm-Maß K_{ij}, die Verbesserung $\Delta R_{ij,w}$ vorhandene Vorsatzschalen auf dem entsprechenden Weg (ij) und ein Korrekturterm über die gemeinsame Kantenlänge (l_0) und die Trennwandfläche (S_S).
Das Flankenschalldämm-Maß ist also im Wesentlichen der Mittelwert der Schalldämm-Maße der Bauteile auf dem Übertragungsweg kombiniert mit Verbesserungsmaßen aus raumseitigen Vorsatzschalen und Stoßstellen. Die Definition einer Stoßstelle ist nachstehend grafisch dargestellt:

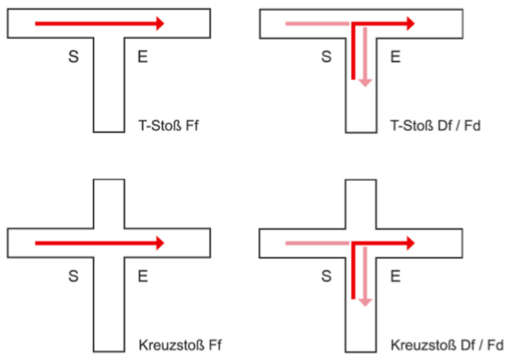


Abb. 31: Schallübertragung über die Stoßstellen zwischen flankierendem und trennendem Bauteil

Bei Fassadenanschlüssen liegen T-Stöße vor, andere Stöße im Gebäude sind meist Kreuzstöße. Die Stoßstellendämmmaße werden aus Formelzusammenhängen in Abhängigkeit von der mittleren Masse der Bauteile auf dem Übertragungsweg berechnet. Meist liegen positive Werte (Verbesserungsmaße) vor, der Mindestwert liegt bei -4 dB (Leichtbauweisen, Minderung der Schalldämmung). Genauere Angaben über Stoßstellendämm-Maße bei Leichtbauweisen liegen noch nicht vor.

12.1.3 Stoßstellendämm-Maß K_{ij}

Das Stoßstellendämm-Maß K_{ij} in dB kennzeichnet die Dämmung von Körperschall an einer Stoßstelle von Bauwerksteilen und ergibt sich aus der richtungsgemittelten Differenz der Schnellepegel auf den Bauteilen an der Stoßstelle, normiert auf die Länge der Stoßstelle und auf die äquivalente Absorptionslängen der beiden betrachteten Bauteile. Für Bauteile im Massivbau wird das Stoßstellendämm-Maß meist als frequenzunabhängig angenommen.
Die Norm DIN 4109 definiert vier Stoßstellentypen, für das das Dämm-Maß auf Grundlage einer Hilfsgröße M berechnet wird.

$$M = \lg\left(\frac{m'_{\perp,i}}{m'_i}\right)\,[\mathrm{dB}]$$

M: Hilfsgröße zur Berechnung des Stoßstellendämmmaßes
m'_i: flächenbezogene Masse des Bauteils i im Übertragungsweg ij in kg/m²
$m'_{\perp,i}$: flächenbezogene Masse des anderen die Stoßstelle bildenden Bauteils senkrecht dazu in kg/m²

Für übliche Arten von Stoßstellen kann für das Stoßstellendämm-Maß K_{ij} aus den flächenbezogenen Massen der mit der Stoßstelle verbundenen Bauteile für unterschiedliche Geometrien der Stoßstelle berechnet werden. Die Stoßstellen mit biegesteifer Verbindung massiver homogener Bauteile ist nachstehend für die entsprechenden Geometrien zusammengefasst:

Ecke	$K_{12} = 2{,}7 + 5{,}7 \cdot M^2$ (dB)
Dickenwechsel	$K_{12} = 5 \cdot M^2 - 5$ dB (dB)
T-Stoß	$K_{12} = 4{,}7 + 5{,}7 \cdot M^2$ (dB)
	$K_{13} = 5{,}7 + 14{,}1 \cdot M + 5{,}7 \cdot M^2$ (dB), für $M < 0{,}215$
	$K_{13} = 8 + 6{,}8 \cdot M$ (dB), für $M \geq 0{,}215$
Kreuzstoß	$K_{12} = 5{,}7 + 15{,}4 \cdot M^2$ (dB)
	$K_{13} = 8{,}7 + 17{,}1 \cdot M + 5{,}7 \cdot M^2$ (dB), für $M < 0{,}182$
	$K_{13} = 9{,}6 + 11 \cdot M$ (dB), für $M \geq 0{,}182$

Bei der Ermittlung des Stoßstellendämm-Maßes K_{ij} wird bei T- und Kreuzstößen vorausgesetzt, dass die Fortsetzung eines Bauteils sofern vorhanden nach der Stoßstelle dieselbe flächenbezogene Masse aufweist wie vor der Stoßstelle. Die Norm handhabt Stoßstellen mit unterschiedlichen flächenbezogenen Massen wie folgt:

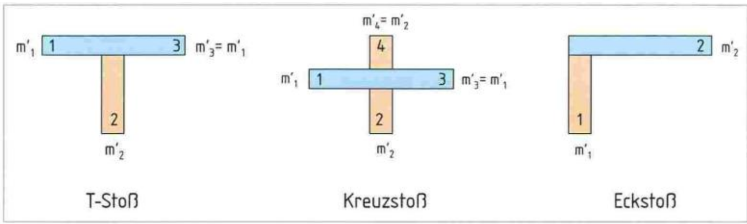


Abb. 32: Stoßstellen mit Bauteilnummerierung; m'_1, m'_2, m'_3 flächenbezogene Masse der Bauteile

Weitere Regelungen zur Ermittlung der Stoßstellendämm-Maße K_{ij} sind in DIN 4109 Teil 32 enthalten.
Unter anderem wird dort auch die vollständig entkoppelte Stoßstelle beschrieben, die dann vorliegt, wenn ein oder mehrere der am Knotenpunkt aufeinanderstoßenden Bauteile zu den anderen keinen mechanischen Kontakt haben. Das ist z.B. der Fall bei Trennfugen zwischen den massiven Bauteilen oder beim Anschluss von Leichtbauteilen an massive Bauteile. Das Stoßstellendämm-Maß über solch eine akustische Trennung kann theoretisch so hoch angesetzt werden, dass die Schallübertragung über den betrachteten Schallübertragungsweg nicht mehr zur Gesamtschalldämmung beiträgt. Dies gilt am Bau jedoch nur dann, wenn das Bauteil umlaufend von angrenzenden Bauteilen entkoppelt ist. Ist das Bauteil nur vom Trennbauteil getrennt, kann es nach wie vor durch angrenzende flankierende Bauteile angeregt werden. Man spricht in diesem Fall von Schalübertragung 2. und höherer Ordnung, bei der eine zusätzliche Schallübertragung über zwei und mehr Stoßstellen zur Gesamtübertragung beiträgt. Die Schallübertragung über diese Wege 2. und höherer Ordnung begrenzen bei einer akustisch vom Trennbauteil getrennten leichten massiven Innenwand die theoretisch erreichbare Erhöhung des Stoßstellendämm-Maßes auf etwa ΔK_{ij} = 20 dB. Dieser Wert kann im Massivbau als Obergrenze der erreichbaren Verbesserung des Stoßstellendämm-Maßes gengenommen werden.
Eine grafische Einordnung üblicher Stoßstellen ist nachfolgend dargestellt:

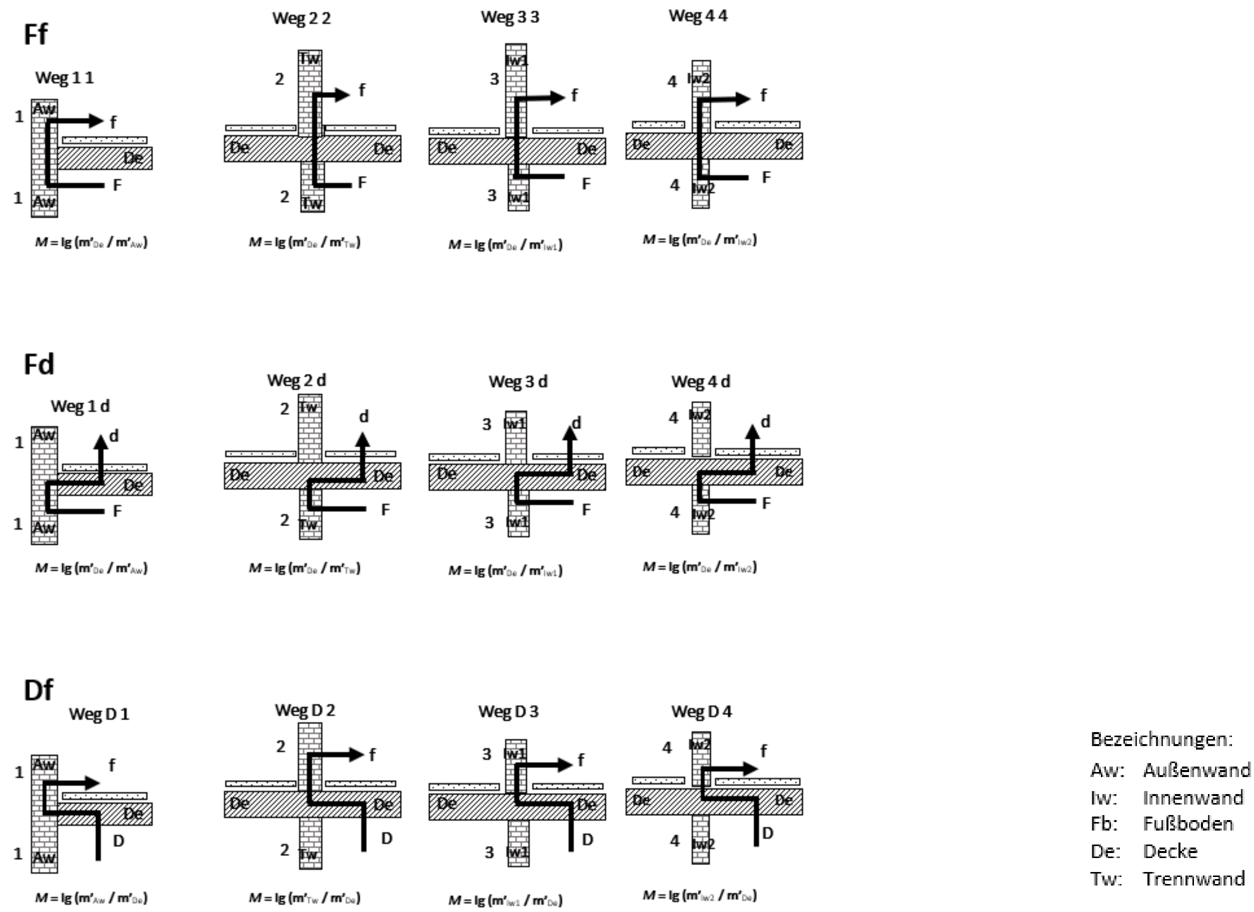


Abb. 33: Schallübertragungswege über die Stoßstellen zwischen flankierendem und trennendem Bauteil

Das Stoßstellendämm-Maß K_{ij} kann also für übliche starre Bauteilverbindungen aus dem Verhältnis der flächenbezogenen Masse der an der Stoßstelle beteiligten Bauteile berechnet werden.
Wenn das wie oben beschrieben ermittelte oder aus Prüfberichten entnommene K_{ij} kleiner als ein Mindestwert $K_{ij,min}$ ist, so ist dieser Mindestwert zu nehmen. Dieser ist gegeben durch:

$$K_{ij,min} = 10 \lg \left[l_f l_0 \left(\frac{1}{S_i} + \frac{1}{S_j} \right) \right]$$

Dabei ist

$K_{ij,min}$ das anzusetzende minimale Stoßstellendämm-Maß auf dem Übertragungsweg ij, in dB;

l_f die gemeinsame Kopplungslänge der Verbindungsstelle zwischen dem trennenden und dem flankierenden Bauteil, in m;

l_0 die Bezugskopplungslänge; l_0 = 1 m;

S_i die Fläche des angeregten Bauteils im Senderaum, in m²;

S_j die Fläche des abstrahlenden Bauteils im Empfangsraum, in m².

Hat das flankierende Bauteil sehr wenig oder gar keine bauliche Berührung mit dem trennenden Bauteil, so ist K_{Ff} gleich diesem Mindestwert anzunehmen und die Übertragungswege F_d und D_f sind zu vernachlässigen.

Bei der Berechnung der Schallübertragung über massive flankierende Bauteile bleiben Fenster- und Türflächen, solange sie nicht geschosshoch sind, unberücksichtigt. Geschosshohe Türen und Fensterflächen vermindern die schallübertragenden Flächen. Bei flankierenden Bauteilen, die aus mehreren Teilen bestehen, ist das Schalldämm-Maß des mit dem trennenden Bauteil unmittelbar verbundenen größeren Teils zu berücksichtigen. Wenn durchgehende Diskontinuitäten im Bauteil vorhanden sind, wie z. B. raumhohe Türen oder schwere Querbauteile, können die Flächen hinter diesen Diskontinuitäten vernachlässigt werden. Die flankierende Übertragung von Leichtbauwänden erfolgt im Massivbau entsprechend den Vorgaben für den Holz-, Leicht- und Trockenbau über die bewertete Norm-Flankenschallpegeldifferenz $D_{n,f,w}$ des flankierenden Bauteils auf dem Schallübertragungsweg F_f, wobei hier die Übertragungswege F_d und D_f zu vernachlässigen sind.

Die Flankenschalldämm-Maße über die flankierenden Bauteile R_{Ff}, R_{Df} und R_{Fd} werden dann entsprechend nach Gleichung (74) im Einzelnen berechnet:

Flanke 1	$R_{Ff,1,w} = (R_{F,1,w} + R_{f,1,w})/2 + \Delta R_{Ff,1,w} + \max(K_{Ff,1,min}, K_{Ff,1}) + 10 \cdot \log(S_S / (1\,[m] \cdot l_{f,1}\,[m]))$
	$R_{Fd,1,w} = (R_{F,1,w} + R_{d,1,w})/2 + \Delta R_{Fd,1,w} + \max(K_{Fd,1,min}, K_{Fd,1}) + 10 \cdot \log(S_S / (1\,[m] \cdot l_{f,1}\,[m]))$
	$R_{Df,1,w} = (R_{D,1,w} + R_{f,1,w})/2 + \Delta R_{Df,1,w} + \max(K_{Df,1,min}, K_{Df,1}) + 10 \cdot \log(S_S / (1\,[m] \cdot l_{f,1}\,[m]))$
Flanke 2	$R_{Ff,2,w} = (R_{F,2,w} + R_{f,2,w})/2 + \Delta R_{Ff,2,w} + \max(K_{Ff,2,min}, K_{Ff,2}) + 10 \cdot \log(S_S / (1\,[m] \cdot l_{f,2}\,[m]))$
	$R_{Fd,2,w} = (R_{F,2,w} + R_{d,2,w})/2 + \Delta R_{Fd,2,w} + \max(K_{Fd,2,min}, K_{Fd,2}) + 10 \cdot \log(S_S / (1\,[m] \cdot l_{f,2}\,[m]))$
	$R_{Df,2,w} = (R_{D,2,w} + R_{f,2,w})/2 + \Delta R_{Df,2,w} + \max(K_{Df,2,min}, K_{Df,2}) + 10 \cdot \log(S_S / (1\,[m] \cdot l_{f,2}\,[m]))$
Flanke 3	$R_{Ff,3,w} = (R_{F,3,w} + R_{f,3,w})/2 + \Delta R_{Ff,3,w} + \max(K_{Ff,3,min}, K_{Ff,3}) + 10 \cdot \log(S_S / (1\,[m] \cdot l_{f,3}\,[m]))$
	$R_{Fd,3,w} = (R_{F,3,w} + R_{d,3,w})/2 + \Delta R_{Fd,3,w} + \max(K_{Fd,3,min}, K_{Fd,3}) + 10 \cdot \log(S_S / (1\,[m] \cdot l_{f,3}\,[m]))$
	$R_{Df,3,w} = (R_{D,3,w} + R_{f,3,w})/2 + \Delta R_{Df,3,w} + \max(K_{Df,3,min}, K_{Df,3}) + 10 \cdot \log(S_S / (1\,[m] \cdot l_{f,3}\,[m]))$
Flanke 4	$R_{Ff,4,w} = (R_{F,4,w} + R_{f,4,w})/2 + \Delta R_{Ff,4,w} + \max(K_{Ff,4,min}, K_{Ff,4}) + 10 \cdot \log(S_S / (1\,[m] \cdot l_{f,4}\,[m]))$
	$R_{Fd,4,w} = (R_{F,4,w} + R_{d,4,w})/2 + \Delta R_{Fd,4,w} + \max(K_{Fd,4,min}, K_{Fd,4}) + 10 \cdot \log(S_S / (1\,[m] \cdot l_{f,4}\,[m]))$
	$R_{Df,4,w} = (R_{D,4,w} + R_{f,4,w})/2 + \Delta R_{Df,4,w} + \max(K_{Df,4,min}, K_{Df,4}) + 10 \cdot \log(S_S / (1\,[m] \cdot l_{f,4}\,[m]))$

12.2 Trittschalldämmung

Als Trittschall wird der Körperschall bezeichnet, der z.B. bei Anregung durch Begehen einer Decke oder durch Stühlerücken, etc. erzeugt und vom angeregten Bauteil, meist einer Decke, abgestrahlt wird. Körperschall ist also der allgemeine Begriff von Trittschall und ist an Schwingungsvorgängen in festen Körpern (elastische Stoffe, Materialien) gebunden.

Als Trittschalldämmung wird üblicherweise eine weiche Zwischensicht verstanden, die zwischen Rohdecke und Estrich eingelegt wird.

Besonders wirksam ist die Entkopplung des Körperschalls durch elastische Zwischenschichten.

In diesem Zusammenhang spricht man dann von einem schwimmenden Estrich.

Je schwerer die Rohdecke und je weicher die Trittschalldämmung, desto besser ist der Trittschallschutz.

Dieser beschreibt, dass Gehgeräusche in dem darunter liegenden Raum und in den Nachbarräumen leiser gehört wird.

Die „Weichheit“ der elastischen Zwischenschicht beschreibt die dynamische Steifigkeit *s‘* mit der Maßeinheit [MN/m³].

Das Maß für die Trittschalldämmung ist der bewertete Norm-Trittschallpegel $L'_{n,w}$ in dB.

Wird der Trittschall gemessen, wird das zu prüfende Bauteil mit einem Norm-Hammerwerk angeregt.

Im Empfangsraum wird der erzeugte Körperschall von allen raumumschließenden Bauteilen als Luftschall abgestrahlt und messtechnisch erfasst.

Weil die Anregung des Bauteils stets definiert erfolgt, ist der abgestrahlte Luftschall unter Berücksichtigung der Schallabsorption im Empfangsraum ein Maß für das Trittschallverhalten. Der von der tatsächlich vorhandenen Absorptionsfläche auf eine vereinbarte Bezugs-Absorptionsfläche umgerechnete Trittschallpegel wird Norm-Trittschallpegel L'_n genannt und errechnet sich wie folgt:

$$L'_n = L_i + 10 \lg \frac{A}{A_0} \quad \text{dB} \qquad (75)$$

mit:

L': Norm-Trittschallpegel in dB

L_i: Korrigierter Empfangsraumpegel Norm-Hammerwerk in dB

A: Äquivalente Schallabsorptionsfläche in m²

A_0: Bezugs-Schallabsorptionsfläche in m²

12.2.1 Bewerteter Norm-Trittschallpegel $L_{n,w}$

Die Messkurve für L_n (L'_n bei Messung mit Nebenwegen) von Decken in fertigem Zustand wird mit einer vorgegebenen Bezugskurve B verglichen (Abb. 34).
Diese Bezugskurve berücksichtigt analog zur Luftschalldämmung, dass das menschliche Ohr für hohe Frequenzen empfindlicher ist als für tiefe.
Die Parallelverschiebung der Bezugskurve (in ganzen dB) kennzeichnet das Trittschalldämm-Maß der gemessenen Decke, wobei die Überschreitung der verschobenen Bezugskurve (vB) durch die Messkurve (M) im Mittel nicht größer sein darf als 2 dB (Unterschreitungen werden nicht berücksichtigt).
Die Verschiebung der Bezugskurve zu niedrigeren Pegelwerten ist positiv, zu höheren Pegelwerten negativ.
Der Einzahlwert ergibt sich beim Ablesen der verschobenen Bezugskurve des Norm-Trittschallpegels bei einer Frequenz von 500 Hz.

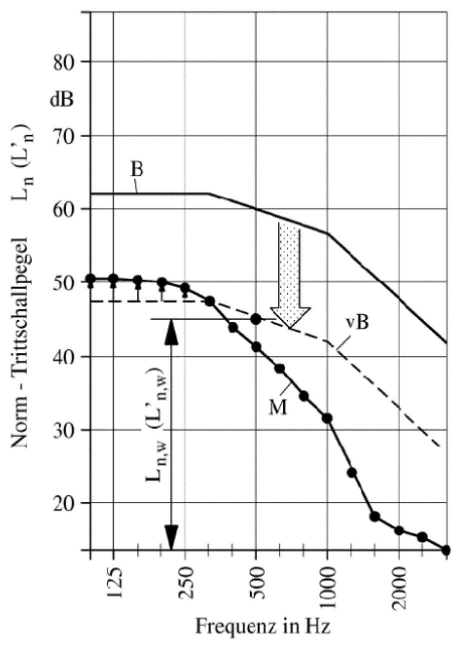


Abb. 34: Ermittlung des bewerteten Norm-Trittschallpegel $L_{n,w}$, $L'_{n,w}$ durch Verschieben der Bezugskurve B ($L_{n,w}$, $L'_{n,w}$ = 46 dB), M Messkurve, Bv verschobene Bezugskurve

Nachstehende Grafik (Abb. 35) zeigt einen tatsächlich gemessenen Trittschallpegel (blaue Kurve) über der Frequenz, wie er sich typischerweise für eine Stahlbetondecke mit schwimmendem Estrich ergibt.

Die rote Kurve zeigt die verschobene Bezugskurve nach DIN EN ISO 717 Teil 2 die zur Ermittlung der Einzahlangabe verwendet werden muss.

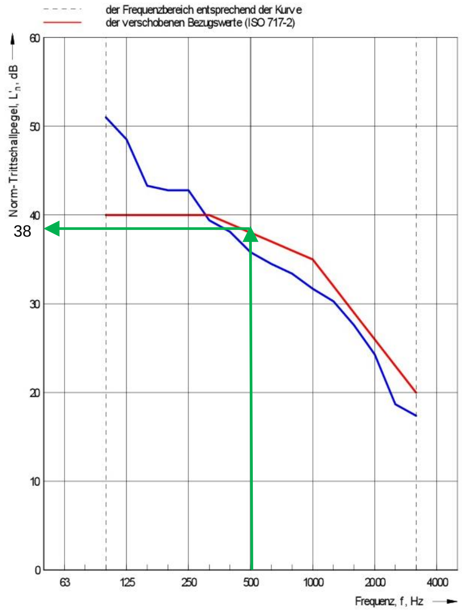


Abb. 35: Gemessener Norm-Trittschallpegel im Frequenzbereich von 100 Hz bis 3.150 Hz.

Aus der Abbildung 35 liest man an der verschobenen Bezugskurve bei der Frequenz von 500 Hz einen bewerteten Norm-Trittschallpegel von $L'_{n,w}$ = 38 dB ab.

13 Resultierendes Schalldämm-Maß

13.1 Energetisch gemittelte Schalldämmung

Die Schallübertragung zwischen Räumen erfolgt über die trennende Wand oder Decke sowie über die flankierenden Wände und Decken. Abbildung 36 zeigt exemplarisch an einer Trennwand und einer flankierenden Wand die verschiedenen Übertragungswege.

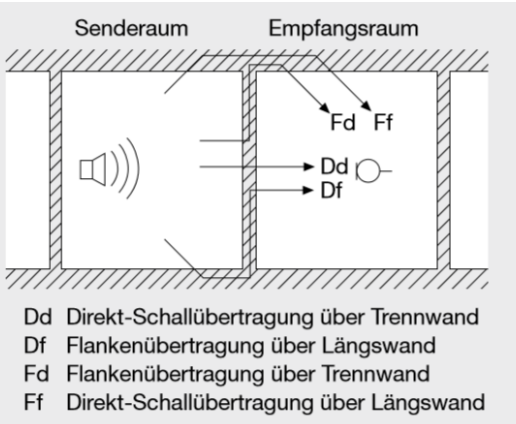


Abb. 36: Schallübertragung zwischen dem lauten Senderaum und dem leisen Empfangsraum über das trennende Bauteil und die flankierenden Bauteile.

Für jedes Flankenbauteil ergeben sich daher drei Übertragungswege. Im Einzelnen sind dies:

- Weg Ff: das Flankenbauteil nimmt im Senderaum Schall auf, leitet ihn weiter und strahlt den Schall in den Empfangsraum ab
- Weg Fd: das Flankenbauteil nimmt im Senderaum Schall auf, leitet ihn in das Trennbauteil weiter und dieses strahlt den Schall in den Empfangsraum ab
- Weg Df: das Trennbauteil nimmt im Senderaum Schall auf, leitet ihn in das Flankenbauteil weiter und dieses strahlt den Schall in den Empfangsraum ab

Für eine einfache Raumtrennung mit einer Trennwand, jeweils zwei flankierenden Wänden und Decken ergeben sich somit 13 Übertragungswege, die bei der Berechnung des Bau-Schalldämm-Maßes *R'* zu berücksichtigen sind. Das heißt, neben dem direkten Schalldurchgang durch das trennende Bauteil, sind 12 Schallnebenwege (3 pro Flanke je 4 Flanken (Seitenwände, Decke und Fußboden)) zu beachten.
Die Flankenübertragung wurde bei Massivbauweisen entsprechend DIN EN ISO 12354 über die Schalldämm-Maße der flankierenden Bauteile im Sende- und im Empfangsraum ggf. mit Vorsatzschalen und Stoßstellendämm-Maßen gelöst. Das bewertete Bau-Schalldämm-Maß einer z.B. Wohnungstrennwand, ergibt sich durch die „energetische Addition“ der direkten und flankierenden Schalldämm-Maße nach Gleichung (76):

$$R'_w = -10\lg\left[10^{-R_{Dd,w}/10} + \sum_{F=f=1}^{n} 10^{-R_{Ff,w}/10} + \sum_{f=1}^{n} 10^{-R_{Df,w}/10} + \sum_{F=1}^{n} 10^{-R_{Fd,w}/10}\right] \qquad (76)$$

$R_{Dd,w}$ stellt dabei das Direktschalldämm-Maß für das Trennbauteil und $R_{Ff,w}$, $R_{Df,w}$ und $R_{Fd,w}$ die Flanken-Schalldämm-Maße dar.

Jeder Übertragungsweg kann unabhängig von den anderen Wegen behandelt und berechnet und für jeden dieser Übertragungswege ein eigenes Schalldämm-Maß ermittelt werden.

13.4 Flächengemittelte Schalldämmung

Werden verschiedene Bauteile aus *n* Teilflächen unterschiedlicher Schalldämmung zusammengesetzt (siehe Abb. 37), erhält man das resultierende Schalldämm-Maß R_{res} aus den Schalldämm-Maßen $R_{w,i}$ der einzelnen Teilflächen.

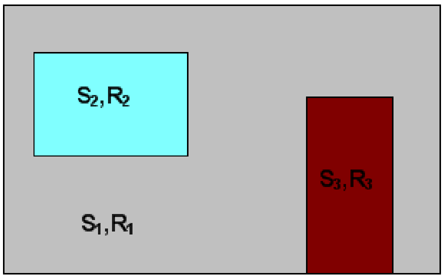


Abb. 37: Bauteil aus *n* = 3 Teilflächen unterschiedlicher Schalldämmung

Bei bekannten Schalldämm-Maßen $R_{w,i}$ der einzelnen Bauteile ist das resultierende Schalldämm-Maß R_{res} der Gesamtfläche von Interesse. Das erhält man, indem man die Schallleistung aus den Teilleistungen zusammensetzt, die durch die einzelnen Bauteile übertragen werden. Die Teilleistungen sind dem jeweiligen Schalltransmissionsgrad τ_i und der Teilfläche S_i proportional. So ergibt sich für den gesamten Schalltransmissionsgrad τ_{res}:

$$\tau_{res} = \frac{\sum S_i \cdot \tau_i}{\sum S_i} \quad [-] \tag{77}$$

daraus folgt das resultierende Schalldämm-Maß:

$$R_{res} = -10 \cdot lg \frac{\sum S_i \cdot 10^{-R_i/10}}{\sum S_i} \quad [\text{dB}] \tag{78}$$

Werden also z.B. Fenster, Rollläden, Türen, etc. in Wände eingebaut, dann ergibt sich aus der energetischen Addition aller beteiligten Einzelübertragungen das resultierende Schalldämm-Maß $R'_{w\,res}$ aus:

$$R'_{w\,res} = -10 \cdot lg\left(\frac{1}{S_{ges}}\left(S_1 \cdot 10^{-\frac{R'_{w1}}{10}} + S_2 \cdot 10^{-\frac{R'_{w2}}{10}} + ... + S_n \cdot 10^{-\frac{R'_{wn}}{10}}\right)\right) \quad [\text{dB}] \tag{79}$$

mit

S_1 bis S_n	Flächen der einzelnen Elemente des Bauteils
$S_{ges} = \sum_1^n S_n$	Summe der Einzelflächen
R'_{w1} bis R'_{wn}	bewertete Schalldämm-Maße (R'_w bzw. R_w) der einzelnen Elemente des Bauteils

Hinweis

In DIN 4109 wird das resultierende Bau-Schalldämm-Maß $R'_{w,res}$ als gesamtes Bau-Schalldämm-Maß $R'_{w,ges}$ bezeichnet.

14 Rechenregeln

In der Akustik ist es üblich, den Schalldruckpegel in Dezibel (dB) anzugeben. Die Dezibelskala ist logarithmisch aufgebaut. Das hat den Vorteil, dass der große Wahrnehmungsbereich des Gehörs von 0 dB (Hörschwelle) bis 130 dB (Schmerzgrenze) beschrieben werden kann. Es bedeutet aber auch, dass für Dezibelwerte nicht die einfachen Rechenregeln gelten, sondern auch mit Logarithmen gerechnet wird. Addiert man die Schallpegel, so ergibt 50 dB plus 50 dB nicht 100 dB, sondern 53 dB. Das heißt, eine Erhöhung oder Verminderung des Schallpegels um drei dB entspricht einer Verdopplung oder Halbierung der Schallintensität.

14.1 Schallpegel-Addition

Bei der Einwirkung mehrerer Schallquellen ergibt sich eine Zunahme der Schallimmission. Schallpegelwerte dürfen jedoch nicht einfach arithmetisch addiert werden. Demzufolge ist der Summenpegel *L* der drei einwirkenden Schallpegel: L_1 = 35 dB(A), L_2 = 40 dB(A), L_3 = 45 dB(A), keinesfalls 120 dB(A)!

Es dürfen nicht die Pegel in Dezibel, die ja keine physikalischen Größen darstellen, addiert werden, sondern es müssen die Pegel zuerst in physikalische Schalldrücke zurückgeführt werden, aus deren Summe wiederum ein Gesamtschallpegel gebildet wird.

Generell gilt folgende Gleichung für die energetische Addition:

$$L = 10 \lg \sum_i 10^{0,1 L_i} \tag{80}$$

Dazu muss für jeden Summanden L_i zunächst der Ausdruck $10^{0,1L_i}$ gebildet werden.
Hiermit werden die Pegel delogarithmiert, d.h. das Ergebnis stellt das Verhältnis des physikalischen Schalldruckes p zur Bezugsgröße (normierte Hörschwelle) $p_0 = 2.10^{-5}$ Pa dar, welche addiert werden können.
Durch anschließendes Logarithmieren der Summe wird wiederum der Pegel aus der Summe der physikalischen Schalldrücke gebildet. Für die oben angegebenen drei Schallpegel ergibt sich also:
$L_{ges} = 10 \lg(10^{3,5} + 10^{4,0} + 10^{4,5}) = 46,5$ dB.

Die Pegeladdition lässt sich auch unter Zuhilfenahme der Abbildung 38 jeweils paarweise für zwei Schallpegelwerte ausführen. Dabei liest man mit dem Additionslineal unter der Differenz der zu addierenden Schallpegel (oben) den Wert (unten) heraus, um welchen der größere der beiden Schallpegel im Ergebnis zu erhöhen ist. Hierbei sollten immer zunächst die kleinsten Pegel addiert werden, um die größte Genauigkeit zu erreichen. Um den Summenpegel also von mehr als zwei Schallquellen zu bestimmen, kann zunächst mit Hilfe von Abbildung 38 der resultierende Schallpegel der beiden leisesten berechnet werden; dann können beide zusammen als eine betrachtet, dazu die Pegelerhöhung durch die drittleiseste addiert werden usw.

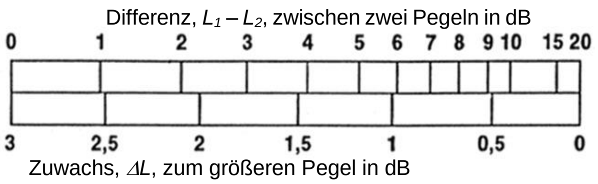


Abb. 38: Nomogramm zur Addition von zwei Schallpegeln (Additionslineal)

Schallpegelunterschied zwischen L_1 und L_2 in dB. Ablesewert in dB zum größeren Pegel addieren

Addiert man im obigen Beispiel lediglich die Summanden L_2 und L_3 erhält man: 40 dB + 45 dB = 46,2 dB.
Man kommt zur Schlussfolgerung, dass der Summand L_1 = 35 dB den Summenpegel praktisch nicht mehr beeinflusst und deshalb von vornherein hätte vernachlässigt werden können.

Auch aus dem Additionslineal der Abbildung 38 kann man die folgende wichtige Regel ableiten:
Unterscheiden sich zwei Schallpegel um mindestens 10 dB, leistet der jeweils niedrigere Pegel zum Summenpegel praktisch keinen Beitrag mehr.
65 dB + 54 dB ≈ 65 dB
43 dB + 44 dB + 58 dB ≈ 58 dB
(denn 43 dB + 44 dB kann höchstens 47 dB ergeben, was 11 dB unter 58 dB liegt.)

Die Addition zweier gleicher Schallpegel führt zu einem um drei Dezibel höheren Summenpegel, was aufgrund der Definitionen im Abschnitt 7.2 einer Verdoppelung der Schallleistung entspricht. Somit gilt z.B.
55 dB + 55 dB ≈ 58 dB.

Hinweis:
Viele kleine Pegel können auch zur Pegelerhöhung beitragen trotz Vorhandenseins eines Pegels, welcher mehr als 10 dB höher liegt als diese.
Es gilt: 50 dB + 40 dB = 50,4 dB, aber
50 dB + 10 x 40 dB = 53 dB
da 10 x 40 dB = 50 dB!

14.2 Fremdgeräuschkorrektur

Wirken auf einen Meßort neben dem zu messenden Geräusch Fremdgeräusche ein, so ist vorzugsweise in Pausen der Fremdgeräusche zu messen oder in den Zeiten, in denen der Pegel der Fremdgeräusche um mindestens 10 dB unter dem des zu beurteilenden Geräusches liegt. Kann der äquivalente Dauerschallpegel der Fremdgeräusche - z.B. in den Pausen des zu messenden Geräusches - bestimmt werden und liegt dieser Wert um ΔL = 3 dB bis 10 dB unter dem des Gesamtgeräusches, so ist vom äquivalenten Dauerschallpegel des Gesamtgeräusches die Fremdgeräuschkorrektur *K* nach Gleichung (81) abzuziehen.

$$K = -10 \log \left(1 - \frac{1}{10^{0,1\,\Delta L/\mathrm{dB}}}\right) \mathrm{dB} \qquad (81)$$

Pegeldifferenz ΔL (dB)	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	11	12
Korrektur K (dB)	-6,87	-4,33	**-3,02**	**-2,20**	**-1,65**	**-1,26**	**-0,97**	**-0,75**	**-0,58**	**-0,46**	-0,36	-0,28

Beispiel:

Gesamtgeräusch: L_{ges} = 73 dB(A)

Fremdgeräusch: L_2 = 68 dB(A)

Differenzpegel ΔL = 73 dB(A) – 68 dB(A) = 5 dB

Korrektur K = 1,65 dB

Zu messender Schallpegel: $L_1 = L_{ges}$ – K = 73 dB(A) – 1,65 dB = 71,35 dB(A)

14.3 Energetische Mittelwertbildung

Die Mittelwertbildung verläuft analog zur energetischen Schallpegel-Addition, wobei jedoch nach der Addition der Glieder $10^{0,1L}$ durch deren Anzahl zu dividieren ist, und zwar vor dem Logarithmieren.

$$L = 10 \lg \frac{1}{n} \sum_{i=l}^{n} 10^{0,1L_i} \qquad (82)$$

Der Mittelungspegel L_m ergibt sich demnach im Beispiel:

L_1 = 35 dB, L_2 = 40 dB, L_3 = 45 dB zu

$L_m = 10 \lg (1/3\,(10^{3,5} + 10^{4,0} + 10^{4,5}))$

L_m = 42 dB (aufgerundet)

Das Beispiel zeigt, dass in einer Reihe unterschiedlicher Schallpegel der energetische Mittelungspegel näher bei den höheren Werten liegt, als es bei einer arithmetischen Mittelwertbildung der Fall wäre.

Da es oft um die Mittelung zeitlich schwankender Geräusche geht, lässt sich die entsprechende Rechenregel dieser Fragestellung dadurch anpassen, dass man statt durch die Anzahl der Werte durch die Gesamt-Beobachtungszeit bzw. Messzeit "*T*" dividiert und jedes der Additionsglieder $10^{0,1L}$ mit der Einwirkzeit "t_i" des Pegelwertes L_i während der Gesamt-Messzeit "*T*" multipliziert:

$$L_m = 10 \lg \frac{1}{T} \sum_{i=1}^{n} T_i \, 10^{\frac{L_i}{10}} \qquad (83)$$

Der Rechengang soll am Beispiel einer fiktiven Lärmmessung erläutert werden, welche über eine Messzeit *T* = 16 Stunden in der Zeit von 06.00 Uhr bis 22.00 Uhr stattgefunden hat.

Für die einzelnen Stunden ergaben sich dabei die folgenden energetischen Mittelwerte:

06.00 bis 08.00 Uhr: 60 dB $t_1 = 2$ h

08.00 bis 10.00 Uhr: 45 dB $t_2 = 2$ h

10.00 bis 18.00 Uhr: 35 dB $t_3 = 8$ h

18.00 bis 20.00 Uhr: 45 dB $t_4 = 2$ h

20.00 bis 22.00 Uhr: 55 dB $t_5 = 2$ h

Der berechnete Mittelungspegel für die gesamte Tagzeit von 06.00 bis 22.00 Uhr (T = 16 h) beträgt:

$L_m = 52{,}4$ dB.

Auch dieses Ergebnis belegt, dass es die hohen Pegelwerte sind (hier die vier lautesten Stunden), die das Ergebnis des Mittelungspegels am meisten beeinflussen, da

$$10\lg\left[\frac{1}{16}\left(2*10^{6}+2*10^{5,5}\right)\right]=52{,}2\text{dB} \tag{84}$$

Da in der Praxis interessiert, welche Zeitblöcke mit unterschiedlichen Pegeln am meisten zum Gesamtpegel beitragen, werden Teilbeurteilungspegel gebildet, indem der Pegel der Teilzeit auf die gesamte Beurteilungszeit bezogen wird. Für den Teilbeurteilungspegel gilt in dem oben genannten Beispiel

$$L_{m_i}=10\lg\left[\frac{1}{T}*10^{0,1L_i}\right] \tag{85}$$

Für das Beispiel ergeben sich hieraus folgende Teilbeurteilungspegel:

L_{m1} = 51,0 dB

L_{m2} = 36,0 dB

L_{m3} = 32,0 dB

L_{m4} = 36,0 dB

L_{m5} = 46,0 dB

Die Summe dieser Teilbeurteilungspegel ergibt wiederum L_m = 52,4 dB.

Aus den Teilbeurteilungspegeln ist erkennbar, dass der Pegel mit 60 dB über 2 Stunden Einwirkdauer die maßgebende Größe für den Gesamtpegel über 16 Stunden darstellt.

Wie aus den Regeln der energetischen Pegeladdition und Mittelung leicht abzuleiten ist, gilt im Übrigen:

- *Eine Halbierung (Verdoppelung) der Einwirkungszeit eines Geräusches vermindert (erhöht) seinen Mittelungspegel um 3 dB.*
- *Eine Halbierung (Verdoppelung) der Schallleistung eines Geräusches vermindert (erhöht) seinen Mittelungspegel gleichfalls um 3 dB.*

Potenz- und Logarithmusregeln mit Beispielen

Grundlegende Potenzregeln

Formel	Bedeutung
$a^0 = 1$	Potenz mit dem Exponent 0
$a^1 = a$	Potenz mit dem Exponent 1
$a^m \cdot a^n = a^{m+n}$	Multiplikation von Potenzen mit gleicher Basis: Potenzen mit gleicher Basis werden multipliziert, indem ihre Exponenten addiert werden.
$(a^m)^n = a^{m \cdot n}$	Potenzierung von Potenzen: Potenzen werden potenziert, indem alle Exponenten miteinander multipliziert werden.
$a^n \cdot b^n = (ab)^n$	Multiplikation von Potenzen mit gleichem Exponent: Potenzen mit gleichem Exponent werden multipliziert, indem die Basen multipliziert werden.
$a^{-n} = \frac{1}{a^n}$	Potenz mit negativem Exponenten
$\frac{a^n}{a^m} = a^{n-m}$	Division von Potenzen mit gleicher Basis
$a^{\frac{1}{n}} = \sqrt[n]{a}$	Potenz deren Exponent das Inverse einer natürlichen Zahl ist
$a^{\frac{m}{n}} = \sqrt[n]{a^m}$	Potenz deren Exponent ein Bruch ist. (Achtung: wenn n gerade ist, muss a größer als 0 sein!)

Beispiele

$10^0 = 1$	—
$10^1 = 10$	$10^{-1} = \frac{1}{10^1} = 0{,}10$
$10^2 = 100$	$10^{-2} = \frac{1}{10^2} = 0{,}010$
$10^3 = 1000$	$10^{-3} = \frac{1}{10^3} = 0{,}0010$

…

$10^1 \times 10^2 = 10^{1+2} = 10^3 = 10 \times 10 \times 10 = 1.000$

$10^2 \times 10^3 = 10^{2+3} = 10^5 = 10 \times 10 \times 10 \times 10 \times 10 = 100.000$

$10^3 \times 10^4 = 10^{3+4} = 10^7 = 10 \times 10 \times 10 \times 10 \times 10 \times 10 \times 10 = 10.000.000$

…

$10^1 \times 10^1 = 10^{1+1} = 10^2 = 10 \times 10 = 100$

$10^2 \times 10^2 = 10^{2+2} = 10^4 = 10 \times 10 \times 10 \times 10 = 10.000$

$10^3 \times 10^3 = 10^{3+3} = 10^6 = 10 \times 10 \times 10 \times 10 \times 10 \times 10 = 1.000.000$

Das Radizieren ist die Umkehrung des Potenzierens

Definition einer Wurzel

$$x^n = a \quad \Leftrightarrow \quad x = \sqrt[n]{a}$$

Dabei bedeutet:

- $\sqrt[n]{a}$: Wurzel (*sprich:* n-te Wurzel von a)
- $\sqrt{}$: Wurzelzeichen
- a: Radikand
- n: Wurzelexponent

Besondere Wurzeln

- $\sqrt[1]{a} = a$
- $\sqrt[2]{a} = \sqrt{a}$: Die zweite Wurzel heißt „Quadratwurzel" oder einfach nur „Wurzel".
  Der Wurzelexponent wird hierbei üblicherweise weggelassen.
- $\sqrt[3]{a}$: Die dritte Wurzel heißt „Kubikwurzel".

Wurzeln addieren

$$a\sqrt[n]{x} + b\sqrt[n]{x} = (a+b)\sqrt[n]{x}$$

Voraussetzung:
- gleicher Radikand
- gleicher Wurzelexponent

$$3\sqrt{2} + 4\sqrt{2} = (3+4)\sqrt{2} = 7\sqrt{2}$$

$$2\sqrt[3]{5} + 6\sqrt[3]{5} = (2+6)\sqrt[3]{5} = 8\sqrt[3]{5}$$

$$5\sqrt[4]{3} + \sqrt[4]{3} = (5+1)\sqrt[4]{3} = 6\sqrt[4]{3}$$

Wurzeln subtrahieren

$$a\sqrt[n]{x} - b\sqrt[n]{x} = (a-b)\sqrt[n]{x}$$

Voraussetzung:
- gleicher Radikand
- gleicher Wurzelexponent

$$4\sqrt{2} - 3\sqrt{2} = (4-3)\sqrt{2} = \sqrt{2}$$

$$7\sqrt[3]{5} - 2\sqrt[3]{5} = (7-2)\sqrt[3]{5} = 5\sqrt[3]{5}$$

$$5\sqrt[4]{3} - \sqrt[4]{3} = (5-1)\sqrt[4]{3} = 4\sqrt[4]{3}$$

Wurzeln multiplizieren

$$\sqrt[n]{a} \cdot \sqrt[n]{b} = \sqrt[n]{a \cdot b}$$

Voraussetzung:
- gleicher Wurzelexponent*
- $a \cdot b \geq 0$

$$\sqrt{2} \cdot \sqrt{2} = \sqrt{2 \cdot 2}$$

$$\sqrt[3]{2} \cdot \sqrt[3]{4} = \sqrt[3]{2 \cdot 4}$$

$$\sqrt[4]{5} \cdot \sqrt[4]{3} = \sqrt[4]{5 \cdot 3}$$

Wurzeln dividieren

$$\frac{\sqrt[n]{a}}{\sqrt[n]{b}} = \sqrt[n]{\frac{a}{b}}$$

Voraussetzung:
- gleicher Wurzelexponent*

$$\frac{\sqrt{3}}{\sqrt{3}} = \sqrt{\frac{3}{3}}$$

$$\frac{\sqrt[4]{32}}{\sqrt[4]{2}} = \sqrt[4]{\frac{32}{2}}$$

$$\frac{\sqrt[3]{2}}{\sqrt[3]{4}} = \sqrt[3]{\frac{2}{4}}$$

Wurzeln potenzieren

$$(\sqrt[n]{a})^m = \sqrt[n]{a^m}$$

$$(\sqrt{2})^3 = \sqrt{2^3}$$

$$(\sqrt[3]{4})^5 = \sqrt[3]{4^5}$$

$$(\sqrt[4]{5})^6 = \sqrt[4]{5^6}$$

Wurzeln radizieren

$$\sqrt[m]{\sqrt[n]{a}} = \sqrt[m \cdot n]{a}$$

$$\sqrt{\sqrt{16}} = \sqrt[2 \cdot 2]{16} = \sqrt[4]{1$$

$$\sqrt[3]{\sqrt[2]{5}} = \sqrt[3 \cdot 2]{5} = \sqrt[6]{5}$$

$$\sqrt[4]{\sqrt[5]{6}} = \sqrt[4 \cdot 5]{6} = \sqrt[20]{6}$$

Logarithmus und Logarithmusfunktion (Die Umkehrfunktion des Potenzierens**)**

Der Logarithmus ist ein mathematischer Ausdruck, der bei der Beantwortung der Fragestellung „***Mit was muss ich a potenzieren, um b zu erhalten***?“ nötig ist.

$a^x = b \leftrightarrow x = \log_a(b)$

Dabei ist ***a*** die Basis des Logarithmus, ***b*** der Numerus und ***x*** der Logarithmuswert.

Die Logarithmusfunktion stellt die Umkehrfunktion einer Exponentialfunktion dar.

Üblicherweise unterscheitet man die Logarithmen entsprechend ihrer **Basis: "2", "e", oder "10"**.

$y = 2^x$ $\rightarrow \log_2(y) = x$

z.B.: $16 = 2^x \Rightarrow \log_2(16) = 4$, denn $2^4 = 16$

$y = e^x$ $\rightarrow \log_e(y) = x$

z.B.: $16 = e^x \Rightarrow \log_e(16) = \ln(16) = 2{,}77259$, denn $e^{2{,}77259} = 16$

$y = 10^x$ $\rightarrow \log_{10}(y) = x$

z.B.: $16 = 10^x \Rightarrow \log_{10}(16) = \lg(16) = 1{,}20412$, denn $10^{1{,}20412} = 16$

Merke:
Der Logarithmus von (0) ist **nicht** definiert!
Der Logarithmus von (1) ist **0**

Rechenregel	Beispiel
$\log_a(u \cdot v) = \log_a u + \log_a v$	$\log_2(4 \cdot 8) = \log_2 4 + \log_2 8 = 2 + 3 = 5$
$\log_a(u : v) = \log_a u - \log_a v$	$\log_3(81 : 9) = \log_3 81 - \log_3 9 = 4 - 2 = 2$
$\log_a u^n = n \cdot \log_a u$	$\log_5 125^4 = 4 \cdot \log_5 125 = 4 \cdot 3 = 12$

<u>Logarithmus dualis (Zweierlogarithmus oder binärer Logarithmus)</u>

Der Logarithmus zur Basis 2 wird auch so geschrieben: **$y = \mathrm{ld}(x)$.**

Merke: $\log_2(x) = \mathrm{ld}(x)$

<u>Logarithmus naturalis (natürlicher Logarithmus)</u>

Hat man die Basis e (e = 2,718282… = Euler’sche Zahl), so führt dies zum natürlichen Logarithmus.
Dies sieht dann zum Beispiel so aus: $y = \log_e(x)$.
Dafür existiert auch eine abgekürzte Schreibweise **$y = \ln(x)$**.

Merke: $\log_e(x) = \ln(x)$

<u>Dekadischer Logarithmus (Zehnerlogarithmus)</u>

Hat man hingegen die Basis 10, führt dies zum dekadischen Logarithmus oder auch Zehnerlogarithmus. Die Form: $y = \log_{10}(x)$. Auch hier existiert eine Abkürzung: lg (x).

Merke: $\log_{10}(x) = \lg(x)$

Wir halten fest:

Es gibt in der Akustik zwei wichtige Formen des Logarithmus:
- den dekadischen Logarithmus *log* mit der Basis 10
- den natürlichen Logarithmus *ln* mit der Basis *e.* (Die *Eulersche Zahl* ist *e* = 2,718...)

Umrechnen der Logarithmen

Allgemein gilt für Logarithmen mit beliebiger Basis a:

$\log_a (y) = \log_b (y) / \log_b (a)$

Damit können wir auch Logarithmen wie zum Beispiel mit der Basis a = 2 (Logarithmus dualis) berechnen.
Dazu benötigen wir nur Zehnerlogarithmen (Basis b): ld (y) = lg (y) / lg (2)

Rechnen wir also den natürlichen Logarithmus (Basis e) in den dekadischen (Basis 10) um, so müssen wir mit 2,303 multiplizieren oder durch 0,4343 teilen. Denn der natürliche Logarithmus einer Zahl (Numerus) ist im Wert größer als der des dekadischen Logarithmus.

Beispiel:

Natürlicher Logarithmus (*ln*) in dekadischen Logarithmus *(lg)* umrechnen.

ln (5) = lg (5) / lg (e) = lg (5) x ln (10)

1,6094 = 0,6989 / 0,4343 = 0,6989 x 2,3025 = 1,6094

log (5) = ln (5) / ln (10) = ln (5) x lg (e)

0,6989 = 1,6094 / 2,3025 = 1,6094·x 0,4343 = 0,6989

Merke

ln 10 = 2,303

lg e = 0,4343

Beispiele, wo der Logarithmus in der Akustik Verwendung findet.

DIN 18041: Hörsamkeit in Räumen - Anforderungen, Empfehlungen und Hinweise für die Planung

Räume der Gruppe A

A1 „Musik“:

$T_{Soll,A1} = (0,45 \lg(V/m^3) + 0,07)$ s $30 m^3 < V < 1 000 m^3$

A2 „Sprache/Vortrag“:

$T_{Soll,A2} = (0,37 \lg(V/m^3) - 0,14)$ s $50 m^3 < V < 5 000 m^3$

Nutzungsart	bei Raumhöhen h< 2, 5 m m^2/m^3	bei Raumhöhen h> 2, 5 m m^2/m^3
B1	ohne Anforderung	ohne Anforderung
B2	A/V 0,15	A/V $[4,80 + 4,69 \lg (h/1 m)^{-1}$
B3	A/V 0,20	A/V $[3,13 + 4,69 \lg (h/1 m)]^{-1}$
B4	A/V 0,25	A/V $[2,13 + 4,69 \lg (h/1 m)]^{-1}$
B5	A/V 0,30	A/V $[1,47 + 4,69 \lg (h/1 m)]^{-1}$

Dabei ist
A die äquivalente Schallabsorptionsfläche eines Raums in Quadratmeter
V das Raumvolumen in Kubikmeter
h die lichte Raumhöhe in Meter

A1: $T = 0,45 \times \boldsymbol{log_{10}}(\mathbf{V}) + 0,07$

B1: $A/V = \frac{1}{4,80 + 4,69 \times \boldsymbol{log_{10}}(\mathbf{h})}$

Beispiel aus der Akustik

Aus der klassischen **Theorie der Nachhallzeit** wissen wir, dass: $\frac{\hat{p}_r^2}{\hat{p}_{r(0)}^2} = e^{-t/\tau_E}$

10 log10 ($\frac{\hat{p}_r^2}{\hat{p}_{r(0)}^2}$) = 10 log10 ($e^{-t/\tau_E}$) ⇒ 10 log10 (e) = 4,343 ⇒ = 4,343 t/τ_E

mit $\tau_E = \frac{4V}{Ac}$

⇒ 4,343 $\frac{t}{\frac{4V}{Ac}}$ ⇒ 10 log10 ($\frac{p_2{}^2}{p_1{}^2}$) = ΔSPL = 60 dB = 10 log10 (e^{-t/τ_E})

mit $\frac{60}{4{,}343}$ = 13,816 ⇒ T_{60} = 13,816 τ_E = 13,816 $\frac{4V}{Ac}$ = $\frac{55{,}262\ \mathrm{V}}{\mathrm{A\ c}}$ = $\frac{0{,}16\ \mathrm{V}}{\mathrm{A}}$

Das ist die bekannte „Sabine’sche Formel“

Weiterführende Literatur

DEGA-Empfehlung 101: Akustische Wellen und Felder, Deutsche Gesellschaft für Akustik e. V., (2006) (Download: https://www.dega-akustik.de/publikationen/online-publikationen/dega-empfehlung-101/)

Fasold, W., Veres, E.: Schallschutz und Raumakustik in der Praxis. Verlag für Bauwesen, Berlin, (2003)

Fischer, H.-M.; Schneider, M.: Handbuch zu DIN 4109 – Schallschutz im Hochbau, Grundlagen–Anwendung–Kommentare. Wilhelm Ernst & Sohn Verlag, Berlin (2019)

Kuttruff, H.: Akustik, eine Einführung. S. Hirzel Verlag, (2004)

Möser, M., Kropp, W., Körperschall - Physikalische Grundlagen und technische Anwendungen. Springer Verlag, Berlin (2010)

Moll, W., Moll, A.: Schallschutz im Wohnungsbau: Gütekriterien, Möglichkeiten, Konstruktionen. Ernst & Sohn Verlag, (2011)

Müller G., Möser M., Taschenbuch der Technischen Akustik. Springer Verlag, Berlin (2004)

Schirmer, W. (Hrsg.): Technischer Lärmschutz. Grundlagen und praktische Maßnahmen zum Schutz vor Lärm und Schwingungen von Maschinen. Springer Verlag, Berlin (2006)

Willems, W. M. (Hrsg.): Lehrbuch der Bauphysik, Schall - Wärme - Feuchte - Licht - Brand – Klima. 8. Auflage. Springer Vieweg Verlag (2017)

PlanungsPraxis Schallschutz in Wohngebäuden. Planung und Auslegung nach DIN 4109 und VDI 4100.
4. überarbeitete Auflage, Forum Verlag Herkert GmbH, Merching (2021)

Wichtige Normen und Regelwerke

DIN 1320, Akustik – Begriffe, Beuth, Berlin (2009)

DIN 4109, Teil 1-2, Teil 4-5, Teil 31-36, Schallschutz im Hochbau, Beuth, Berlin

DIN 8989, Schallschutz in Gebäuden – Aufzüge, Beuth, Berlin (2019)

DIN EN 12354, Teil 1-6, Bauakustik - Berechnung der akustischen Eigenschaften von Gebäuden aus den Bauteileigenschaften, Beuth, Berlin

DIN EN ISO 717, Teil 1-2, Bewertung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen, Beuth, Berlin

DIN EN ISO 3382, Teil 1-3, Messung von Parametern der Raumakustik, Beuth, Berlin

DIN EN ISO 10052, Akustik - Messung der Luftschalldämmung und Trittschalldämmung und des Schalls von haustechnischen Anlagen in Gebäuden, Beuth Verlag, Berlin (2018)

DIN EN ISO 16283, Teil 1 - 3, Akustik – Messung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen am Bau, Beuth, Berlin

VDI-Richtlinie 2571, Schallabstrahlung von Industriebauten
(Anmerkung: Die VDI 2571 wurde im Oktober 2006 zurückgezogen. Stattdessen wird vom VDI die DIN EN 12354-4 (Bauakustik – Berechnung der akustischen Eigenschaften von Gebäuden aus den Bauteileigenschaften – Teil 4: Schallübertragung von Räumen ins Freie) empfohlen. Die VDI 2571 ist dennoch weiter anzuwenden, da die TA Lärm auf diese verweist.)

VDI-Richtlinie 2719, Schalldämmung von Fenstern und deren Zusatzeinrichtungen, Beuth, Berlin (1987)

VDI-Richtlinie 2720, Blatt 1, Schallschutz durch Abschirmung im Freien, Beuth, Berlin (1997)

VDI-Richtlinie 4100, Schallschutz im Hochbau - Wohnungen - Beurteilung und Vorschläge für erhöhten Schallschutz, Beuth Verlag, Berlin (2012)