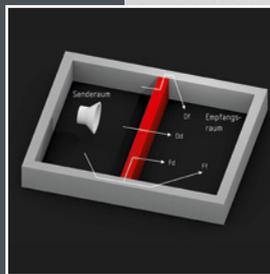
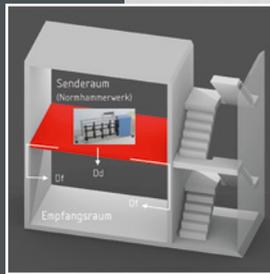
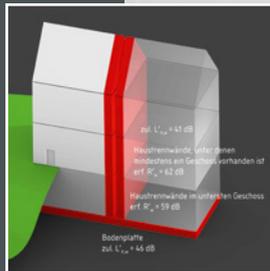


Birger Gigla

Schallschutz

Immissionsschutz, Bau- und Raumakustik
verstehen – planen – nachweisen



Birger Gigla

Schallschutz

Immissionsschutz, Bau- und Raumakustik
verstehen – planen – nachweisen

Birger Gigla

Schallschutz

Immissionsschutz, Bau- und Raumakustik
verstehen – planen – nachweisen

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über www.dnb.de abrufbar.

ISBN (Print): 978-3-7388-0047-0

ISBN (E-Book): 978-3-7388-0048-7

Lektorat: Claudia Neuwald-Burg

Redaktion: Roger Takács

Satz · Layout · Herstellung: Gabriele Wicker

Umschlaggestaltung: Martin Kjer

Druck: Offizin Scheufele Druck und Medien GmbH & Co. KG, Stuttgart

Die hier zitierten Normen sind mit Erlaubnis des DIN Deutsches Institut für Normung e. V. wiedergegeben. Maßgebend für das Anwenden einer Norm ist deren Fassung mit dem neuesten Ausgabedatum, die bei der Beuth Verlag GmbH, Burggrafenstraße 6, 10787 Berlin, erhältlich ist.

Alle Rechte vorbehalten.

Dieses Werk ist einschließlich aller seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die über die engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes hinausgeht, ist ohne schriftliche Zustimmung des Fraunhofer IRB Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Speicherung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen und Handelsnamen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass solche Bezeichnungen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und deshalb von jedermann benutzt werden dürften.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z. B. DIN, VDI, VDE) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert werden, kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.

© Fraunhofer IRB Verlag, 2018

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB

Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart

Telefon +49 711 970-2500

Telefax +49 711 970-2508

irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	9
1 Einleitung	11
2 Physikalische und audiologische Grundlagen	13
2.1 Physikalische Größen	13
2.2 Schallausbreitung: Schwingungen und Wellen	17
2.3 Bau- und raumakustische Größen	26
2.3.1 Pegel	26
2.3.2 Schalleistungspegel L_W	28
2.3.3 Schallintensitätspegel L_I	28
2.3.4 Schalldruckpegel L	29
2.3.5 Pegelrechnung	30
2.3.6 Umrechnung zwischen Schalleistung und Schalldruck	35
2.3.7 Berechnung der Entfernungsabnahme	38
2.4 Hörwahrnehmung des Menschen	41
3 Raumakustik	45
3.1 Überblick	45
3.2 Geschichtliche Entwicklung	47
3.3 Planungsgrößen	49
3.3.1 Diffuses Schallfeld und Nachhallzeit T	49
3.3.2 Absorber und Schallabsorptionsgrad α	51
3.3.3 Äquivalente Schallabsorptionsfläche A	54
3.3.4 Sprachverständlichkeit und Sprachübertragungsindex STI	59
3.4 Anforderungen und Nachweise	61
3.4.1 Anwendungsbereich	61
3.4.2 Raumgruppe A (Vortragssituation)	65
3.4.3 Raumgruppe B (Gesprächssituation)	70
3.5 Unterrichtsräume	72
3.5.1 Einführung	72
3.5.2 Unterrichtsräume ohne Schallabsorber	73
3.5.3 Unterrichtsräume mit Schallabsorbieren	77
3.5.4 Kursräume und Flure	78

3.6	Mehrpersonenbüros	80
3.6.1	Planungsgrundlagen	80
3.6.2	Planung auf Grundlage von Richtlinie VDI 2569:1990	84
3.6.3	Planung auf Grundlage von Richtlinie VDI 2569:2016	85
3.6.4	Mitarbeiterbefragung	89
3.6.5	Raumakustische Messungen in Großraumbüros	90
3.7	Akustische Barrierefreiheit und Inklusion	91
4	Bauakustik	93
4.1	Überblick	93
4.2	Messung der Schalldämmung in Gebäuden	95
4.2.1	Vorbemerkung	95
4.2.2	Luft- und Trittschalldämmung	95
4.2.3	Fassadenschalldämmung	103
4.2.4	Schall von gebäudetechnischen Anlagen	105
4.2.5	Tieffrequente Geräuschmissionen	106
4.2.6	Kennzeichnende Größen für bauakustische Anforderungen	112
4.3	Mindestschallschutz	115
4.3.1	Einführung	115
4.3.2	Luft- und Trittschalldämmung in Gebäuden	121
4.3.3	Luftschalldämmung von Außenbauteilen	128
4.3.4	Besonders laute Räume	128
4.3.5	Gebäudetechnische Anlagen und Gewerbebetriebe	130
4.3.6	Raumlufttechnische Anlagen im eigenen Wohnbereich	132
4.4	Erhöhter Schallschutz von Wohnräumen	132
4.5	Physikalische Grundlagen der Schalldämmung	140
4.5.1	Vorbemerkung	140
4.5.2	Luftschalldämmung einschaliger Bauteile	141
4.5.3	Luftschalldämmung mehrschaliger Bauteile	143
4.5.4	Trittschalldämmung	146
4.5.5	Rechnerisches Nachweiskonzept der DIN 4109-2:2018	149
4.6	Rechnerische Nachweise	156
4.6.1	Vorbemerkung	156
4.6.2	Luftschalldämmung	158
4.6.3	Trittschalldämmung	172
4.7	Treppen, Treppenpodeste und Treppenräume	182
4.7.1	Schalldämmende Konstruktion	182
4.7.2	Rechnerischer Nachweis	185
4.7.3	Nachweisbeispiel	187

4.8	Aufzugsanlagen für Wohngebäude	188
4.8.1	Grundsätzliche Anforderungen und Normen	188
4.8.2	Technische Bestandteile von Aufzugsanlagen	190
4.8.3	Abmessungen und Eigenschaften von Aufzugsanlagen	192
4.8.4	Geräusche beim Betrieb von Aufzugsanlagen	194
4.8.5	Bauakustische Anforderungen	196
4.8.6	Überprüfung des Schallschutzes durch Messung	196
4.8.7	Lärmminderung	197
4.8.8	Hinweise zur Planung	198
4.9	Luftschalldämmung von Außenbauteilen	199
4.9.1	Einführung	199
4.9.2	Außenlärmquellen	205
4.9.3	Überlagerung mehrerer Außenlärmquellen	210
4.9.4	Mindestschallschutz	214
4.9.5	Erhöhter Schallschutz	221
4.9.6	Hinweise für die Planung	223
5	Schallimmissionsschutz	233
5.1	Einführung	233
5.1.1	Emission und Immission	233
5.1.2	Beurteilungsgrößen	237
5.1.3	Soundscape	240
5.2	Rechtliche Grundlagen	242
5.2.1	Bundes-Immissionsschutzgesetz	242
5.2.2	4. BImSchV (genehmigungsbedürftige Anlagen)	244
5.2.3	16. BImSchV (Verkehrslärmschutzverordnung)	245
5.2.4	18. BImSchV (Sportanlagenlärmschutzverordnung)	249
5.2.5	34. BImSchV (Verordnung über die Lärmkartierung)	252
5.3	Gewerbelärm (TA Lärm)	253
5.3.1	Anwendungsbereich	253
5.3.2	Richtwerte für Immissionsorte außerhalb von Gebäuden	255
5.3.3	Richtwerte für Immissionsorte innerhalb von Gebäuden	257
5.3.4	Rechnerische Ermittlung des Beurteilungspegels	257
5.3.5	Prognoseverfahren	259
5.3.6	Rechenbeispiele	263
5.4	Weitere Richtlinien zum Schallimmissionsschutz	269
5.4.1	Freizeitlärmrichtlinien	269
5.4.2	Nichtöffentliche Parkplätze (Parkplatzlärmstudie)	273
5.4.3	Baulärm	280
5.4.4	Geräuschkontingentierung	282

5.5	Tieffrequente Geräuscheinwirkungen	283
5.5.1	Einführung	283
5.5.2	Anforderungen	285
5.5.3	Hinweise für die Objektplanung	288
6	Verzeichnis der verwendeten bau- und raumakustischen Größen	293
7	Literatur	297
8	Stichwortverzeichnis	309

Vorwort

Die Bauakustik hat in der jüngeren Zeit einen intensiven Änderungsprozess durchlaufen. Die »alte Schallschutz-Norm« DIN 4109 mit ihrem Beiblatt 1 aus dem Jahr 1989 war auf Grundlage der Landesbauordnungen noch bis in das Jahr 2018 zum Nachweis des Mindestschallschutzes im Hochbau anzuwenden. Aufgrund ihres hohen Alters wurde in der Praxis häufig die unzutreffende Vermutung geäußert, die DIN 4109:1989 würde nicht mehr gelten. Nach jahrzehntelanger Diskussion ist erst im Juli 2016 eine neue Fassung der Norm in insgesamt neun Teilen erschienen.

Parallel wird das bauaufsichtliche Konzept in Deutschland umgestellt: Die bisherigen länderweisen Listen der Technischen Baubestimmungen werden durch die neue Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen (MVV TB) ersetzt. In der Entwurfsfassung der Verwaltungsvorschrift (E VVTB Juli 2016) wurde vollständig auf die Anforderungen und das Rechenverfahren der neuen Normenreihe DIN 4109:2016 umgestellt.

Die veröffentlichte erste Fassung der Muster-Verwaltungsvorschrift (August 2017) führt jedoch nur die neuen Mindestanforderungen der DIN 4109-1:2016 verbindlich ein. Der schalltechnische Nachweis wird freigestellt: Er darf nach DIN 4109-2:2016 erfolgen. Für Bauteile im Massivbau kann weiterhin das alte Beiblatt 1 zu DIN 4109:1989 herangezogen werden. Die europäischen Rechenverfahren zur Schalldämmung (DIN EN ISO 12354-1 bis -4:2017), an denen sich die DIN 4109-2:2016 orientiert, wären in Deutschland damit nicht verbindlich. Die Vorgabe der Muster-Verwaltungsvorschrift hat zu kritischen Reaktionen einiger Bundesländer geführt und es ist nicht ausgeschlossen, dass weitere Überarbeitungen erfolgen.

Unbeeindruckt vom Hin und Her bei der Einführung als technische Regeln sind die DIN 4109-1 und DIN 4109-2 im Januar 2018 kurzfristig in nochmals überarbeiteter Fassung erschienen. Anlass war die Berücksichtigung von Anpassungen der Verkehrslärmschutzverordnung (16. BImSchV). Der beschriebene Änderungsprozess betrifft nur den Mindestschallschutz. Die Frage des »erhöhten« Schallschutzes sorgt für zusätzliche Diskussionen.

Das vorliegende Buch geht auf den aktuellen Stand der Entwicklungen ein und ermöglicht Planerinnen und Planern die sachgerechte Entwicklung bauakustischer Konzepte entsprechend dem gegenwärtigen Stand der Technik.

1 Einleitung

Die akustischen Eigenschaften sind ein wichtiges Qualitätsmerkmal für Gebäude. Derzeit werden die ihnen zugrunde liegenden Planungs- bzw. Beratungsleistungen in die fachlichen Bereiche Bauakustik und Raumakustik unterteilt:

Die BAUAKUSTIK beschreibt den Schallschutz von Gebäuden. Aufgabenstellung ist der Schutz von Aufenthaltsräumen gegen Geräusche aus fremden Räumen, von gebäudetechnischen Anlagen und gegen Außenlärm. Aufenthaltsräume sind z. B. Wohnräume, Wohnküchen, Schlafräume, Bettenräume in Krankenhäusern, Unterrichtsräume in Schulen, Büroräume, Praxisräume, Sitzungsräume oder Arbeitsräume [DIN 4109-1:2018]. Ob es sich bei einem Raum um einen Aufenthaltsraum handelt, ergibt sich durch die Nutzung und wird im Regelfall bei der Planung festgelegt. Planungsleistungen zum Schallschutz werden unter dem Begriff Bauakustik zusammengefasst [HOAI 2013].

Ziel der RAUMAKUSTIK ist die Sicherstellung der gewünschten akustischen Qualität für die geplante Nutzung. Im Vordergrund steht die einwandfreie Sprachkommunikation, die eine Begrenzung der »Halligkeit« erfordert. Hierzu werden nutzungs- und frequenzabhängige Grenzwerte für die Nachhallzeit definiert. Unterschieden werden Kommunikation über mittlere und größere Entfernung (»Vortragssituation«), z. B. in Unterrichtsräumen, und Kommunikation über geringe Entfernung (»Gesprächssituation«), wie in Pausenräumen, an Auskunftsschaltern oder in Operationssälen. In Mehrpersonenbüros sind zusätzliche Anforderungen zu beachten, da eine gute Sprachverständlichkeit hier störend wirken kann. Die raumakustische Gestaltung von Konzertsälen ist ein besonderes Fachgebiet.

Für bauliche Planungsmaßnahmen ist darüber hinaus auch der SCHALLIMMISSIONSSCHUTZ von Bedeutung. Er beschreibt den Schutz der Umgebung vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch nutzungsbedingten Lärm (Bild 1).

Das vorliegende Buch beschreibt die fachlichen Grundlagen für Planungsleistungen in der Bau- und Raumakustik und geht auf die aktuellen Anforderungen und die anzuwendenden Technischen Regeln ein. Besonderer Wert wird auf eine praxisnahe, verständliche Gesamtdarstellung des Fachgebietes, einschließlich der physikalischen Grundlagen, gelegt. Das Buch richtet sich an Planerinnen und Planer, die ihr eigenes Verständnis verbessern wollen, und an Studierende. Es ist auch eine Hilfe für interessierte Kreise, die sich fundiert in die Thematik einarbeiten wollen.

Zur Übersicht werden die drei genannten Teilgebiete der Akustik und ihre Berücksichtigung in der Planung in der folgenden Tabelle zusammengestellt:

	Bauakustik (Schallschutz)	Raumakustik (Technische Akustik)	Schallimmissionsschutz (Lärmschutz)
Landesbauordnungen	Gebäude müssen einen ihrer Nutzung entsprechenden Schallschutz haben.		Erschütterungen oder Schwingungen, die von ortsfesten Einrichtungen in baulichen Anlagen oder auf Baugrundstücken ausgehen, sind so zu dämmen, dass Gefahren oder unzumutbare Belästigungen nicht entstehen.
Planungsleistungen (HOAI)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ regelgerechter Luft- und Trittschallschutz ▪ Begrenzung der von außen einwirkenden Geräusche ▪ Begrenzung der Geräusche von Anlagen der Technischen Ausrüstung 	besondere raumakustische Anforderungen	Schutz der Umgebung vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Lärm
Systemgrenze	<ul style="list-style-type: none"> ▪ zwischen fremden Aufenthaltsräumen ▪ zwischen Aufenthaltsräumen und Außenbereichen oder Erschließungsbereichen 	innerhalb von Räumen	außerhalb von Räumen

Tabelle 1 Teilgebiete der Akustik und ihre Berücksichtigung in der Planung

Bild 1 Warnung vor Baustellenlärm



2 Physikalische und audiologicalhe Grundlagen

2.1 Physikalische Größen

Was ist Schall? Die individuelle Schallerfahrung ist eng an das eigene Hörvermögen geknüpft. Sie umfasst Kommunikation, Töne und Lärm. Wir können hören, ob wir uns in einem Raum oder im Freien befinden. Tiefere Frequenzen werden manchmal sogar körperlich durch Resonanzen im Bauchraum wahrgenommen, z. B. bei einem Orgelkonzert.

Die Schallempfindung wird durch die Audiologie beschrieben. Hierbei handelt es sich um ein wissenschaftliches Arbeitsfeld, in dem Physiker, Mediziner, Biologen und Ingenieure interdisziplinär zusammenarbeiten. Da bei der Planung und Errichtung baulicher Anlagen das Wohl des Menschen im Vordergrund steht, wird die auditive Wahrnehmung in der Bau- und Raumakustik berücksichtigt. Schalleignisse können jedoch nur gehört werden, wenn sie das Ohr des Hörers oder der Hörerin erreichen. Die physikalische Beschreibung der Schallübertragung bildet daher die Grundlage des Schallschutzes.

Baupraktisch von Bedeutung ist die Schallausbreitung in der Luft (Luftschall) und in Bauteilen (Körperschall). Luftschall wird durch Druckschwingungen der Luft übertragen, z. B. bei Sprachkommunikation. Körperschall breitet sich durch Schwingungen in festen Körpern aus, z. B. beim Einschlagen eines Nagels in eine Hauswand. Körperschall wird auch als Luftschall abgestrahlt, etwa bei Trittschall auf einer Wohnungstrenndecke (Trittschall). Luftschall kann als Körperschall in Decken oder Wänden weiterübertragen und an anderer Stelle als Luftschall abgestrahlt werden, wie z. B. elektronische Musik aus einer entfernteren Nachbarwohnung. Man spricht hier von Schalllängsleitung über die flankierenden Bauteile. Geräusche mit tieferen Frequenzen breiten sich über Schalllängsleitung gut aus und sind schwierig zu dämmen. Schall wird auch in Flüssigkeiten übertragen und kann unter Wasser z. B. durch Hydrophone gemessen werden.

Zur physikalischen Beschreibung der Schallausbreitung werden die Größen Druck, Energie und Leistung benötigt. Druck p (von engl. »pressure«) ist definiert als Quotient aus der Normalkraft F_N , die auf eine Fläche wirkt, und der Fläche A (Gl. 1). Die international übliche Einheit des Drucks ist das Pascal (Einheitenzeichen: Pa), entsprechend einem Newton je Quadratmeter [DIN 1314].

$$p = \frac{F_N}{A}, \quad \text{Einheit: } 1 \text{ Pa} = \frac{1 \text{ N}}{\text{m}^2} = \frac{1 \text{ kg}}{\text{s}^2 \cdot \text{m}} \quad (1)$$

Beim Schalldruck in der Luft handelt es sich um einen Überdruck im Vergleich zum vorhandenen Atmosphärendruck. Diese sogenannte atmosphärische Druckdifferenz weist bei Schallereignissen sehr geringe Werte auf und beträgt bei normaler Unterhaltung in einem Meter Abstand 0,01 Pa. Die Schmerzschwelle am Ohr wird bei einer Druckdifferenz von etwa 100 Pa erreicht. Als mittlerer Atmosphärendruck werden 101325 Pa angesehen, zurückgehend auf die früher übliche Druckeinheit atm («physikalische Atmosphäre»). Der Atmosphärendruck ist damit zehn Millionen Mal größer als die Schalldruckdifferenz bei Gesprächen. Die Einheit atm wurde im Jahr 1977 mit Einführung der DIN 1314:1977 durch die Einheit Pascal abgelöst.

Der Sprecher in Bild 2 kann als punktförmige Schallquelle aufgefasst werden. Vereinfacht betrachtet breitet sich der Schall in kugelförmigen Schallwellenfronten durch Luftverdichtungen in Richtung des Hörers aus. Hierbei handelt es sich um eine modellhafte Beschreibung: Aufgrund der Richtwirkung des menschlichen Sprechens ist die Schallausstrahlung nicht perfekt kugelförmig, denn der Schall wird vorwiegend in Sprechrichtung abgestrahlt. Die hervorgerufenen Schalldruckdifferenzen sind sehr viel geringer als der im Bild blau dargestellte Atmosphärendruck. Der Luftdruck ist als Medium Voraussetzung für die Schallübertragung; Im Vakuum kann sich kein Schall ausbreiten.

Die Energie W ist eine grundlegende Größe zur Beschreibung physikalischer Vorgänge. Sie wird in der Mechanik definiert als Produkt aus Kraft F mal Weg s (Gl. 2) und in der Einheit Joule (J) angegeben. Für die mechanische Energie kann auch das Formelzeichen E verwendet werden [DIN 1304-1].

$$W = F \cdot s, \quad \text{Einheit: } 1 \text{ J} = 1 \text{ kg} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 1 \text{ m} \quad (2)$$

Physikalisch ist eine Vielzahl von Energieformen gebräuchlich. Die mechanische Energie wird unterschieden in potenzielle und kinetische Energie. Eine bedeutende bauphysikalische Energiegröße ist die Wärme. In der Thermodynamik wird der Begriff der »inneren Energie« U verwendet, die durch Zufuhr von Wärme verändert werden kann. Für den Stromfluss oder für Elektromagnetismus ist elektrische Energie erforderlich. Andere Energieformen sind die elektromagnetische Strahlungsenergie oder die kernphysikalische Reaktionsenergie.

Energie kann nicht »verbraucht« werden, sondern wird in andere Energieformen umgewandelt. Sie ist erforderlich, um physikalische Vorgänge auszulösen. Zum Beispiel kann einem Körper Wärme zugeführt werden, um dessen Temperatur zu erhöhen.

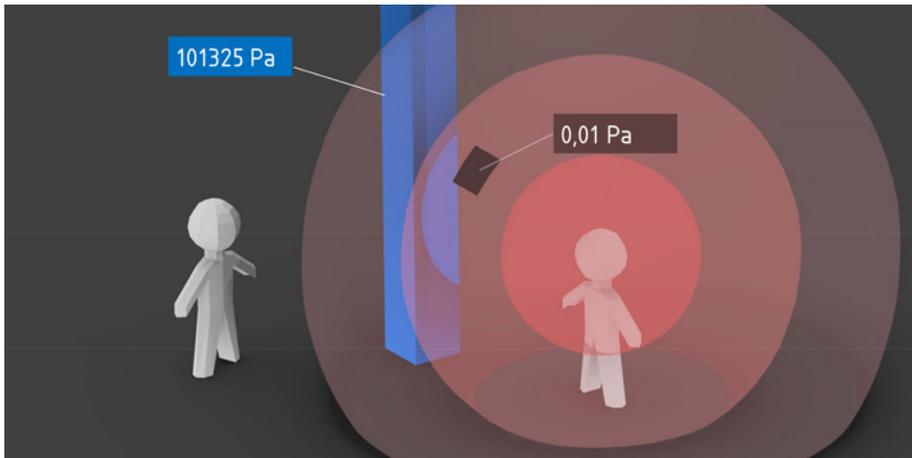


Bild 2 Der Luftschalldruck bei einer Unterhaltung überlagert sich mit dem sehr viel größeren Atmosphärendruck. Gehört werden Druckdifferenzen.

Zur Veranschaulichung des Energiebegriffes wird in Schulen das physikalische System eines Fadenpendels verwendet. Es besteht aus einer Kugel, die an einem ausreichend langen Faden befestigt wird und frei schwingen kann. Um das Pendel in Schwingung zu versetzen, muss die Kugel zunächst angehoben werden. Beim Anheben zum Auslösen der Pendelbewegung wird Energie zugeführt. Während der Pendelbewegung werden fortlaufend potenzielle Energie und kinetische Energie umgewandelt. Am Punkt der größten Auslenkung ist die Geschwindigkeit und damit die kinetische Energie gleich Null und die potenzielle Energie maximal. Am Punkt der geringsten Auslenkung bzw. Höhe ist die potenzielle Energie gleich Null. Dafür ist hier die Geschwindigkeit am höchsten und die kinetische Energie maximal. Durch Energieumwandlung wird die nachfolgende Auslenkung ermöglicht.

Für die physikalische Beschreibung der Schallausbreitung ist von Bedeutung, dass auch zur Komprimierung von Luft Energie erforderlich ist. Dies ist aus dem Alltag vom Aufpumpen eines Fahrradreifens mit Luftpumpe anschaulich bekannt. Hierbei wird zugeführte mechanische Energie auch in Wärme umgewandelt. Die zur Luftverdichtung erforderliche Energie wird durch das Produkt aus Druck und Volumen beschrieben.

Analog zum Fadenpendel kann auch der Energietransport bei der Schallausbreitung in der Luft durch fortwährende Umwandlung von potenzieller und kinetischer Energie beschrieben werden. Bei größter Luftverdichtung ist die lokale Geschwindigkeit der Luftmasse gleich Null und die potenzielle Energie maximal. Am Punkt der geringsten Verdichtung ist die Geschwindigkeit der Luftmasse und damit die kinetische Energie am größten. Möser [Möser, 2012] gibt bezogen auf ein Volumenelement

dV mit der Dicke dx und der Querschnittsfläche S die potenzielle und kinetische Energie folgendermaßen an (Gl. 3):

$$E = E_{\text{pot}} + E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} \frac{p^2}{\rho_0 c^2} \cdot \Delta V + \frac{1}{2} \rho_0 u^2 \cdot \Delta V \quad (3)$$

- E: in einem Luftvolumenelement bei Schallausbreitung momentan gespeicherte Energie als Summe aus potenzieller Energie E_{pot} und kinetischer Energie E_{kin}
 p: Schalldruck (Pa)
 ρ_0 : Dichte der unbewegten Luft
 c: Schallausbreitungsgeschwindigkeit in der Luft (m/s), näherungsweise wird angesetzt: $c = 340$ m/s
 u: Schallschnelle (m/s), beschreibt die Schwinggeschwindigkeit der Luftmasse
 V: Volumen des betrachteten Luftelementes

Die potenzielle Energie ist proportional zum Quadrat des Schalldruckes, mit dem die Luftmasse verdichtet wird. Die kinetische Energie ist proportional zum Quadrat der Schallschnelle, also der Geschwindigkeit, mit der die Luftmasse schwingt. Die Schallschnelle nimmt mit steigender Frequenz zu und darf nicht mit der Schallausbreitungsgeschwindigkeit verwechselt werden. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit gibt an, mit welcher Geschwindigkeit sich die angenommenen kugelförmigen Schallwellenfronten im Raum bewegen. Die Schallschnelle hat in der Bauakustik keine praktische Bedeutung. Bei der sehr kleinen Auslenkung der schwingenden Luftmasse beträgt sie typischerweise weniger als 1 mm/s.

Die Leistung P ist eine Erweiterung des Energiebegriffes und ist definiert als Quotient aus Energie und Zeiteinheit (Gl. 4). Sie beschreibt den Energiefluss als Zeitabhängigkeit der physikalischen Umwandlung der jeweils zugrunde liegenden Energieform und wird in der Einheit Watt (W) angegeben [DIN 1304-1].

$$P = \frac{W}{t}, \quad \text{Einheit: } 1 \text{ W} = \frac{1 \text{ J}}{\text{s}} \quad (4)$$

Durch Umstellung dieser Formel kann Energie auch als Produkt aus Leistung und Zeiteinheit beschrieben werden (Gl. 5):

$$W = P \cdot t, \quad \text{Einheit: } 1 \text{ J} = 1 \text{ W} \cdot \text{s} \quad (5)$$

Diese Schreibweise ist typisch für die Elektrotechnik: Beispielsweise wird in Stromrechnungen die bezogene elektrische Energie typischerweise nicht in Joule, sondern in der Einheit Watt mal Sekunde ($\text{W} \cdot \text{s}$) bzw. kWh angegeben. Physikalisch unzutreffend wird hierbei von »Verbrauch« gesprochen. Die Einheit kWh wird auch in der Wärmelehre für Energie verwendet, z. B. als Wärmestromdichte $q = 281 \text{ kWh/m}^2$.

Der menschliche Körper generiert Leistungen zwischen etwa 100 W bei ruhender Tätigkeit und über 500 W bei schwerer körperlicher Arbeit [DIN EN ISO 8996].

In der Akustik wird die Schalleistung P bei der Luftschallausbreitung als zeitlich gemittelte Energieflussdichte auf eine angenommene Ausbreitungsfläche A der Wellenfront bezogen. Die resultierende physikalische Größe wird als Schallintensität I bezeichnet und in W/m^2 angegeben (Gl. 6). Es handelt sich um eine vektorielle Größe. Der Schallintensitätsvektor steht normal auf der angenommenen Fläche und zeigt in Richtung der Schallausbreitung.

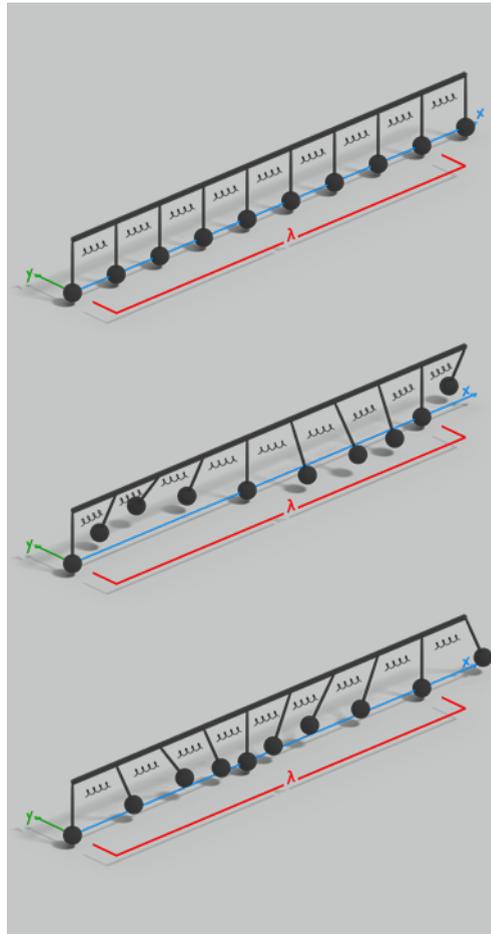
$$I = \frac{P}{A}, \quad \text{Einheit: } \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \quad (6)$$

2.2 Schallausbreitung: Schwingungen und Wellen

Luftschall wird durch Druckdifferenzen übertragen, die sich in der Luft als periodische Luftverdichtungen räumlich ausbreiten. Wie jedoch wird die Luftmasse in Schwingungen versetzt, sodass ein Schalldruck entsteht? Ein physikalischer Versuch zur Demonstration ist die Erzeugung eines Tones durch ein vibrierendes Stahl-Lineal: Wird das Lineal langsam durch den Raum bewegt, entsteht zunächst kein Geräusch. Ein Ton wird erst hervorgerufen, wenn das Lineal am Ende ausgelenkt und in schnelle Schwingungen versetzt wird. Die Luft kann dann das Lineal nicht mehr umströmen und wird lokal verdichtet. In der Schulphysik werden für diesen Versuch biegesteife Blechstreifen als sogenannte »Blattfedern« auf Holzständern verwendet. In Abhängigkeit von Länge und Biegesteifigkeit der Blattfeder werden unterschiedliche Tonhöhen (Frequenzen) als Druckschwingungen abgestrahlt.

Ein physikalisches Modell für die Wellenausbreitung sind gekoppelte Pendel (Bild 3, oben). Hierbei handelt es sich um mehrere Fadenpendel, die z. B. durch Spiralfedern miteinander verbunden sind. Die Verbindung überträgt als »Koppelung« die Schwingung des ersten Pendels auf die benachbarten Pendel, wodurch eine Wellenbewegung entsteht. Die Wellenbewegung breitet sich in Richtung der x -Achse aus. Schwingen die Pendel senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der Welle, entsteht eine Transversalwelle (Bild 3, Mitte). Wasserwellen sind ein typisches Beispiel für Transversalwellen. Luftschallwellen hingegen sind Longitudinalwellen, da die Luftmasse in Ausbreitungsrichtung verdichtet und verdünnt wird. Im Falle der gekoppelten Pendel entsteht eine Longitudinalwelle, wenn die Fadenpendel in der Ausbreitungsrichtung schwingen (Bild 3, unten).

Bild 3 Die Wellenausbreitung wird physikalisch durch gekoppelte Fadenpendel beschrieben.
 Oben: Ruhelage, Mitte: Transversalwelle,
 unten: Longitudinalwelle
 λ : Wellenlänge



Zu beachten ist, dass durch die Wellenausbreitung nur Energie übertragen wird. Die jeweils durch den Schalldruck angeregte Luftmasse schwingt um ihre Ausgangslage hin und her und bewegt sich selbst nicht fort. Auch im Umfeld leistungsstarker Lautsprecher entsteht daher keine Luftströmung, die als Zugluft wahrnehmbar wäre. Dieser Zusammenhang lässt sich bei Wasserwellen anschaulich beobachten. Diese bewegen sich scheinbar vorwärts, z. B. als Wellenfront in Richtung Meeresstrand, oder in Kreisen, nach dem Eintauchen eines Gegenstandes in eine ruhige Wasseroberfläche. Der Blick auf ein Stück Treibholz oder ein schwimmendes Blatt zeigt aber, dass sich die Wasserteilchen tatsächlich nur auf und ab bewegen und Gegenstände an der Wasseroberfläche lotrecht um eine Ruhelage schwingen, ohne ihre Position zu verändern. Analog einem Fadenpendel werden dabei fortwährend potenzielle und kinetische Energie ineinander umgewandelt.

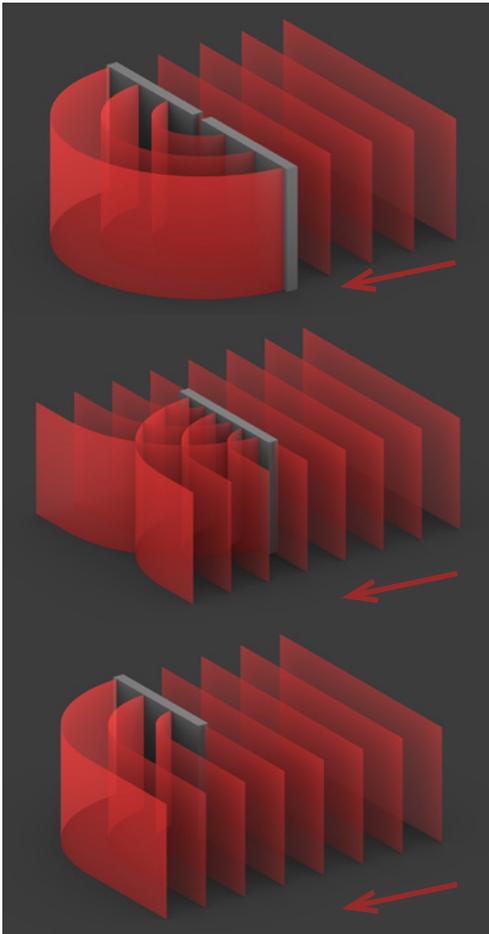


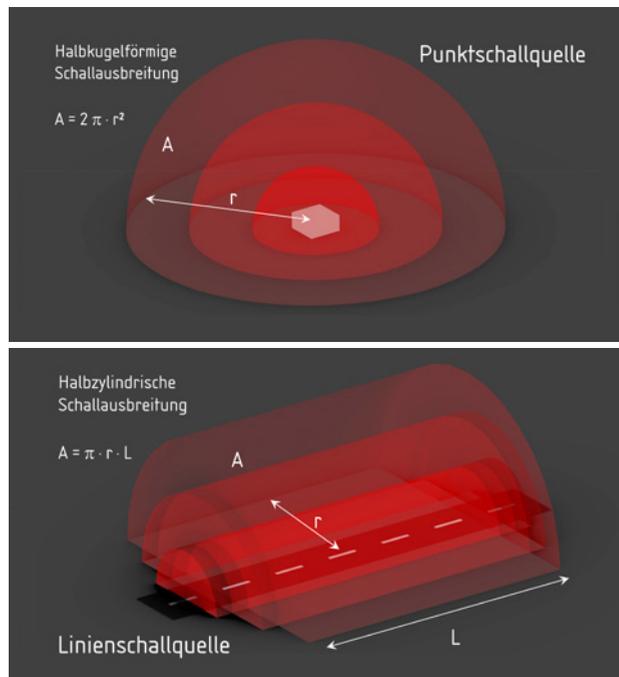
Bild 4 Beugung bei der Wellenausbreitung nach dem Huygensschen Prinzip

Wegen der zugrunde liegenden Wellencharakteristik sind bei der Luftschallausbreitung Entfernungsabnahme, Beugung, Reflexion und Absorption zu berücksichtigen (Bild 4). Dieses betrifft insbesondere den Schallschutz im Städtebau, z. B. bei der Planung der Abschirmwirkung von Lärmschutzwänden. Entsprechend dem Huygensschen Prinzip entstehen an Spalten zwischen Lärmschutzwänden oder an deren Kanten neue Elementarwellen, s. Bild 4, oben. Wahrnehmbare Beugungseffekte sind z. B. bei Schallschutzwänden bekannt: Der Lärm einer hinter der Wand befindlichen Straße ist nicht unhörbar, sondern wird abhängig vom Abstand zur Wand scheinbar von der Wandkrone abgestrahlt, obwohl sie in Wirklichkeit auf gleichem Höhenniveau liegt (Bild 4, Mitte). Reflexionen an Schallschutzwänden führen dazu, dass der Lärm an einem gegenüberliegenden Immissionsort verstärkt wird. Durch Beugungseffekte ist die Abschirmung einer kurzen Lärmschutzwand oftmals gering (Bild 4, unten).

Zur Beschreibung der Schallausbreitung im Freien werden in Abhängigkeit von der Art der Geräuschquelle, ihren Abmessungen und ihrem Abstand vom Immissionsort Punktschallquellen, linienförmige Schallquellen und Flächenschallquellen unterschieden. Schallausbreitungsrechnungen erfolgen zur Vereinfachung typischerweise auf Grundlage von Punktschallquellen.

Punktschallquellen strahlen im Modell kugel- oder halbkugelförmige Schallwellenfronten aus (vgl. Bild 5, oben). Beispiele sind einzelne Geräuschquellen, wie Rasenmäher oder Laubgebläse, sowie geräuscherzeugende betriebliche Anlagen in ausreichender Entfernung. Nach der Norm DIN 18005-1 [DIN 18005-1] kann für Schallausbreitungsrechnungen jede Schallquelle, deren größte Ausdehnung weniger als die Hälfte des Abstands ihres Mittelpunkts von dem betrachteten Immissionsort beträgt, durch eine Punktschallquelle in ihrem Mittelpunkt ersetzt werden, s. Bild 6. Bei ausreichender Entfernung können daher auch Gewerbehallen als Punktschallquellen betrachtet werden.

Bild 5 Halbkugelförmiges Schallausbreitungsmodell (oben) und halbzylindrisches Schallausbreitungsmodell (unten). Da sich die Schallquelle auf dem Boden befindet, erfolgt die Schallausbreitung hier jeweils nur in den oberen Halbraum.



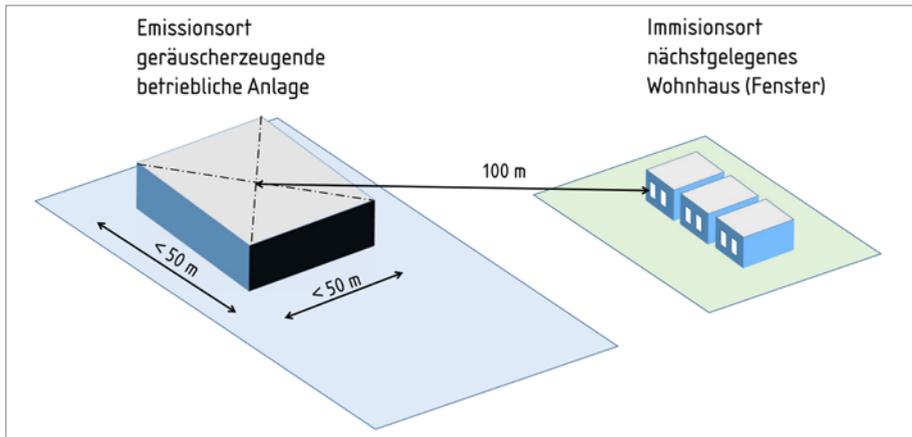


Bild 6 Entfernungabhängigkeit von Punktschallquellen: Jede Schallquelle, deren größte Ausdehnung weniger als die Hälfte des Abstands ihres Mittelpunkts von dem betrachteten Immissionsort beträgt, darf durch eine Punktschallquelle in ihrem Mittelpunkt ersetzt werden (Norm DIN 18005-1).

Zu den Linienschallquellen zählen insbesondere Straßenverkehrslärm und Schienenverkehrslärm. Die Schallabstrahlung erfolgt zylindrisch bzw. halbzylindrisch (vgl. Bild 5, unten). Für die vereinfachte Schallausbreitungsrechnung werden Straßen und Schienenwege in kleine, gerade Teilstücke unterteilt, die als Punktschallquellen abstrahlen.

Wenn der erforderliche Mindestabstand zwischen Emissions- und Immissionsort unterschritten wird, sodass nicht von einer Punktschallquelle ausgegangen werden kann, liegt eine Flächenschallquelle vor. Beispiele sind Fassadenflächen, Parkplätze oder Gewerbegebiete. Zur vereinfachten Schallausbreitungsrechnung werden auch Flächenschallquellen wiederum in einzelne Punktschallquellen aufgeteilt.

Bei der Schallausbreitung im Freien versetzt die Geräuschquelle die umgebende Luft in Druckschwingungen. Die eingesetzte Schallleistung verteilt sich auf die jeweils angenommene Kugel- oder Zylinderoberfläche. Dieser Zusammenhang ist für das Verständnis der Entfernungsabnahme bedeutsam. Da die Druckschwingungen auf immer größere Flächen übertragen werden, nimmt der Schalldruck mit zunehmendem Abstand von der Geräuschquelle ab. Abhängig vom Schallausbreitungsmodell ist hierbei ein geometrischer Effekt zu beachten, vgl. Bild 5:

- Punktschallquelle: Die Kugel- oder Halbkugelfläche nimmt quadratisch mit dem Radius zu. Der Radius entspricht dem Abstand zur Geräuschquelle.
- Linienschallquelle: Die Mantelfläche eines Zylinders bzw. Halbzylinders wächst linear mit dem Radius bzw. Abstand.

Bei gleicher Entfernung verteilt sich die Schallenergie einer Punktschallquelle daher auf eine größere Fläche als die Schallenergie einer Linienschallquelle. Hieraus folgt, dass der Schalldruck bei einer Punktschallquelle mit zunehmendem Abstand stärker abnimmt als bei einer Linienschallquelle.

Die geringere Entfernungsabnahme des Schalldrucks einer Linienschallquelle nutzt man in der Veranstaltungstechnik durch sogenannte Line Arrays aus. Hierbei handelt es sich um eine Zusammenschaltung von Lautsprecherboxen in einer Reihe. Durch Kopplung mehrerer Punktschallquellen entsteht eine Linienschallquelle (Bild 7). Durch diese wird eine deutlich bessere Beschallung erreicht als beim Betrieb einzelner Lautsprecher. Die Tontechnik muss sicherstellen, dass hierdurch in Anlagen keine Gehörgefährdung des Publikums entsteht, vgl. z. B. DIN 15905-5 [DIN 15905-5]. Line Arrays werden auch bei großen Versammlungsstätten im Freien, zum Beispiel in Sportstadien, eingesetzt, um die Sprachverständlichkeit von Sicherheitsdurchsagen zu erhöhen.

Bild 7 In der Veranstaltungstechnik werden mehrere Lautsprecher zu einem »Line Array« zusammengefasst. Als Linienschallquelle wird dann eine zylindrische Schallabstrahlung erreicht. Bei der abgebildeten Musikbühne werden zwei Line Arrays aus jeweils sechs Lautsprecherboxen verwendet.



Wie beschrieben, breiten sich Schallwellen in der Luft als Druckschwingungen aus. Die Schwingungsabnahme mit der Entfernung wird physikalisch als Dämpfung bezeichnet [DIN 1311-2].

Die Schallausbreitung im Freien wird durch die Abnahme des Schalldrucks mit der Entfernung und durch die Topografie sowie durch Beugung und Reflexion der Schallwellen an Hindernissen beeinflusst. Prognosen zur Schallausbreitung für Planungszwecke werden heute überwiegend softwarebasiert erstellt. Ihre Genauigkeit wird

durch die Präzision der Eingangswerte bestimmt. Das geometrische Modell (Lage der Baukörper, Topografie) lässt sich zumeist ausreichend genau beschreiben. In innerstädtischen Bereichen ist jedoch insbesondere die Schallabsorption und Reflexion an Fassadenflächen nur näherungsweise bekannt. Außerhalb von Städten wird die Schallausbreitung durch die jahreszeitliche Vegetation oder den Zustand des Bodens (trocken, feucht, gefroren, schneebedeckt, grasbewachsen) unterschiedlich beeinflusst. Häufig lassen sich daher auch durch Handrechnung mit vereinfachten Grenzbetrachtungen zufriedenstellende Ergebnisse erzielen. (Weiterführende Hinweise zur Dämpfung der Schallausbreitung im Freien finden sich in der Norm DIN ISO 9613-2 [DIN ISO 9613-2].)

Grundsätzliche physikalische Größen zur Beschreibung von Schallwellen sind Frequenz und Wellenlänge:

- Die Schallfrequenz f (auch »Schwingungszahl« oder »Tonhöhe«) gibt die Anzahl der Druckschwingungen je Sekunde an. Für die Frequenz wird die Einheit Hz (Hertz) verwendet. 1 Hz bedeutet eine Schwingung pro Sekunde.
- In unmittelbarem Zusammenhang mit der Frequenz steht die Schallwellenlänge λ . Die Schallwellenlänge λ ist der Abstand der Luftverdichtungen zweier aufeinanderfolgender Wellen und wird in Metern angegeben, vgl. Bild 3.

Bild 8 zeigt die der Bau- und Raumakustik zugrunde liegenden Frequenzbereiche in schematischer Darstellung. Der Hörbereich des menschlichen Ohrs liegt maximal zwischen 16 und 20 000 Hz. Bei kontinuierlicher Lärmexposition sinkt die obere Hörgrenze mit zunehmendem Lebensalter. Unterhalb von 60 Hz ist das Tonhöhenempfinden individuell unterschiedlich ausgeprägt. Töne werden als indifferentes Dröhnen wahrgenommen, unterschiedliche Tonhöhen sind kaum zu unterscheiden. Zwischen 16 und 60 Hz können abhängig von der individuellen Disposition bei betroffenen Personen zusätzliche Dröhn-, Schwingungs- oder Druckgefühle im Kopf auftreten. Vielfach werden auch »Schwebungen« wahrgenommen, die auf Körperresonanzen zurückzuführen sind. Ein ähnlicher Effekt wird beispielsweise bei Pkw-Fahrten über Pflasterbeläge durch Resonanzen hervorgerufen.

Der Frequenzbereich der Sprache umfasst etwa 100 bis 8 000 Hz, wobei das Maximum der Schallintensität bei 300 bis 500 Hz liegt.

Bei der Messung der Schalldämmung von Bauteilen in der Bauakustik werden die Frequenzen zwischen 100 und 3 150 Hz erfasst. Zum Vergleich mit Anforderungswerten wird durch eine normierte Bewertung aus den frequenzweisen Messungen ein repräsentativer Einzahlwert ermittelt. Die Raumakustik erfasst einen etwas größeren Frequenzbereich von 100 bis 5 000 Hz. Unterhalb von 100 Hz beginnt der Bereich der tiefen Frequenzen. Die Messung und Beurteilung tieffrequenter Geräusche ist aufgrund der zugrunde liegenden großen Wellenlängen,

der besonderen Belästigungswirkung und der zu berücksichtigenden Resonanzeffekte ein besonderes Fachgebiet innerhalb der Akustik.

Unterhalb der Hörgrenze von etwa 16 Hz beginnt der Bereich der Erschütterungen und Schwingungen (Infraschall), auf den Menschen unterschiedlich sensibel reagieren. Erschütterungen und Schwingungen werden z. B. durch Schienenverkehr oder Gasturbinen hervorgerufen. Belästigungswirkungen innerhalb von Gebäuden sind ein Teilgebiet der Baudynamik und können durch Schwingungsübertragung auf die Tragstruktur des Gebäudes entstehen, z. B. beim Gläserklirren in Schränken.

In der Praxis treten Belästigungen jedoch häufiger durch Sekundärschall auf. Dieser entsteht, wenn die zu Schwingungen angeregte Tragstruktur des Gebäudes selbst Schall im hörbaren Bereich abstrahlt. Hierbei entstehen typischerweise tief-frequente Geräusche. Betroffene Personen beklagen häufig Brummtöne und Vibrationen unterschiedlicher Intensität zu verschiedenen Zeiten an mehreren Orten ihrer Wohnung.

Auch Schwingungen im Frequenzbereich unterhalb von 1 Hz sind durch den Menschen wahrnehmbar, haben in der Akustik jedoch keine Bedeutung. Sie treten beispielsweise bei Seereisen (Seekrankheit), oder beim Führen von Transportmaschinen auf.

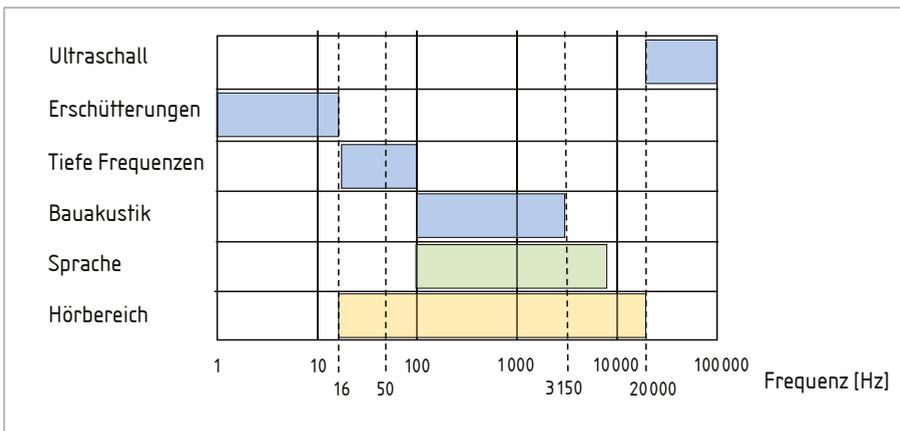


Bild 8 Unterteilung akustischer Frequenzbereiche

Der Zusammenhang zwischen Frequenz f und Wellenlänge λ der Schallwellen wird durch Gleichung 7 beschrieben:

$$f = \frac{c}{\lambda} \text{ [Hz]} \quad (7)$$

Hierbei ist c die Schallgeschwindigkeit in der Luft. Für rechnerische Nachweise in der Bauakustik wird angenommen: $c = 340 \text{ m/s}$.

Aus Gleichung 7 ergibt sich für die Akustik ein großer Bereich von Wellenlängen, der in Tabelle 2 in Abhängigkeit der Frequenzen zwischen 100 und 5 000 Hz dargestellt wird. Die Frequenzen werden in der Tabelle (wie in der Akustik üblich) nicht linear, sondern in »Terzen« angegeben. Beginnend bei 100 Hz stehen nachfolgende Frequenzen im Verhältnis 5/4. Die angegebenen »Terzen« sind die mittleren Frequenzen eines terzbreiten Frequenzbandes. Vereinfachend wird in der Akustik auch die Darstellung in »Oktaven« verwendet, wobei aufeinanderfolgende Frequenzen im Verhältnis 2/1 stehen.

Zwischen 100 Hz und 3 150 Hz ergeben sich insgesamt 16 Terzen oder 6 Oktaven. Die Oktaven sind in Tabelle 2 fett hervorgehoben. Beugung und Reflexionen bei der Ausbreitung von Schallwellen hängen von der Wellenlänge ab. Das Frequenzspektrum der Geräuschquelle ist daher bei der Schallmessung, Schallausbreitung und der Anordnung abschirmender Bauteile von besonderer Bedeutung.

Frequenz f [Hz]	Wellenlänge λ [m]	Frequenz f [Hz]	Wellenlänge λ [m]	Frequenz f [Hz]	Wellenlänge λ [m]
100	3,40	400	0,85	1600	0,21
125	2,72	500	0,68	2000	0,17
160	2,13	630	0,54	2500	0,14
200	1,70	800	0,43	3150	0,11
250	1,36	1000	0,34	4000	0,09
315	1,08	1250	0,27	5000	0,07

Tabelle 2 Die in der Bauakustik betrachteten Schallwellenlängen liegen zwischen 3,40 m bei 100 Hz und 0,07 m bei 5 000 Hz. Die Frequenzen werden als »Terzen« (mittlere Frequenz eines Terzintervalls) angegeben.

Beispiel 2.2 a)

Bei der Messung der Schalldämmung zwischen Räumen soll das Mikrofon etwa ein Viertel der Wellenlänge von den Wänden entfernt stehen. Wie groß ist dieses Maß bei einer Frequenz von 125 Hz?

Lösung:

$$\lambda \cdot f = c \rightarrow \lambda = \frac{c}{f} = \frac{340}{125} = 2,72 \text{ m} \rightarrow d = \frac{2,72}{4} = 0,68 \text{ m}$$

2.3 Bau- und raumakustische Größen

2.3.1 Pegel

Für Schalldruck, Schallenergie und Schalleistung ergeben sich in der Praxis sehr große Wertebereiche. Als Hörschwelle wurde ein Schalldruck am menschlichen Ohr von $20 \mu\text{Pa}$ ($2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$) definiert. Sehr laute Geräusche erreichen Schalldrücke über 600 Pa , z. B. Strahltriebwerke eines Flugzeuges auf einem Rollfeld in etwa 30 m Entfernung. Zwischen diesen beiden Werten liegen sieben Zehnerpotenzen. Aufgrund möglicher Rechen- oder Übertragungsfehler werden für Planungszwecke ungerne halblogarithmische wissenschaftliche Zahlenformate verwendet. Für akustische Größen wurden daher Pegel in Dezibel (dB) eingeführt.

Pegel sind eine Bezugsgröße, wie z. B. auch Prozentangaben. Bekanntermaßen beziehen sich Prozentangaben auf völlig unterschiedliche Größen, wie bspw. eine Ausgangslänge, eine Massenänderung, ein Volumen oder einen finanziellen Gewinn. Die Einheit % ersetzt nicht die physikalische Einheit der jeweils zugrunde liegenden Größe Meter, Kilogramm, Liter oder die Währungseinheit. In gleicher Weise beschreibt die Einheit dB keine neue akustische Größe, sondern einen Verhältniswert der akustischen Größen Schalldruck, Schallenergie oder Schalleistung. Im Unterschied zu Prozentangaben, bei denen der Bezugswert frei wählbar ist, werden die Bezugsgrößen in der Akustik durch die DIN EN ISO 1683 [DIN EN ISO 1683] fest vorgegeben. Die Bezugswerte für Luftschall sind in Tabelle 3 zusammengefasst:

Größe	Symbol	Bezugswert
Schalldruck	p_0	$20 \mu\text{Pa}$ ($2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$)
Schalleistung	P_0	1 pW ($1 \cdot 10^{-12} \text{ W}$)
Schallenergie	W_0	1 pJ ($1 \cdot 10^{-12} \text{ J}$)
Schallintensität	I_0	1 pW/m^2 ($1 \cdot 10^{-12} \text{ W/m}^2$)

Tabelle 3 Bezugswerte für verschiedene Schallgrößen in Luft nach der DIN EN ISO 1683

Der Bezugswert für den Schalldruck entspricht der Hörschwelle am menschlichen Ohr. Da sich bau- und raumakustische Planungsaufgaben am Hörvermögen des Menschen orientieren, werden mit diesem Bezugswert negative Pegelwerte vermieden. Zur Berechnung des Pegelwertes in Dezibel wird die jeweilige Größe im zehnfachen dekadischen Logarithmus durch den definierten Bezugswert dividiert. Als Beispiel wird in Gleichung 8 die Berechnung des Schalleistungspegels angegeben:

$$L_W = 10 \cdot \lg \frac{P}{P_0} [\text{dB}] \quad (8)$$

Pegel werden in der Akustik sehr häufig verwendet. Daher ist ein grundsätzliches Verständnis der Logarithmus-Rechenregeln von Vorteil. Benötigt wird ausschließlich der dekadische Logarithmus: $\log_{10}x$ (sprich: Logarithmus von x zur Basis 10). Dieser wird abgekürzt zu $\lg x$. Das mathematische Ausgangsproblem bei der Anwendung des dekadischen Logarithmus ist die Suche eines unbekanntes Exponenten zur Basis 10, s. Beispiel (Gl. 9):

$$10^x = 1000 \cdot \lg 1000 = 3 \quad (9)$$

Anders ausgedrückt: Wie oft muss die Zahl 10 mit sich selbst multipliziert werden, um 1000 zu erhalten? Antwort: dreimal, denn $10 \cdot 10 \cdot 10 = 10^3 = 1000$.

Die Kenntnis der folgenden Rechenregeln (Gl. 10 bis Gl. 12) ist hilfreich:

$$\lg(a \cdot b) = \lg(a) + \lg(b) \quad (10)$$

Beispiel 2.3 a)

$$\lg(100 \cdot 10) = \lg 100 + \lg 10 = 2 + 1 = 3$$

$$\lg\left(\frac{a}{b}\right) = \lg(a) - \lg(b) \quad (11)$$

Beispiel 2.3 b)

$$\lg\frac{100}{10} = \lg 100 - \lg 10 = 2 - 1 = 1$$

$$\lg(a^n) = n \cdot \lg(a) \quad (12)$$

Beispiel 2.3 c)

$$10 \cdot \lg\left(\frac{p^2}{p_0^2}\right) = 10 \cdot \lg\left(\frac{p}{p_0}\right)^2 = 20 \cdot \lg\left(\frac{p}{p_0}\right)$$

Beispiel 2.3 d)

$$\lg(10^{-4}) = -4 \cdot \lg(10^1) = -4 \cdot 1 = -4$$

Es gilt:

$$\lg(10) = 1, \text{ da } 10^1 = 10$$

$$\lg(1) = 0, \text{ da } 10^0 = 1$$

Die mathematische Umkehroperation des Logarithmus ist das Potenzieren zur Basis 10 (Gl. 13). Sie wird zum Umformen logarithmischer Gleichungssysteme benötigt.

$$y = \lg(x) \Leftrightarrow x = 10^y \quad (13)$$

Beispiel 2.3 e)

$$10^{\lg(7)} = 7$$

2.3.2 Schallleistungspegel L_W

Der Schallleistungspegel beschreibt die Leistung, mit der eine Geräuschquelle die umgebende Luft zu Druckschwingungen anregt. Der Schallleistungspegel hängt ausschließlich von den Eigenschaften der Geräuschquelle ab und ist von der Entfernung oder äußeren Einflussgrößen der Luft unabhängig. Bei technischen Geräten wird der Schallleistungspegel als zeitlich gemittelte Gerätekonstante angegeben, wobei typischerweise unterschiedliche Betriebsarten zu berücksichtigen sind.

Die Berechnung des Schallleistungspegels erfolgt wie in Gleichung 8 angegeben. Die definierte Bezugsschallleistung beträgt $P_0 = 1 \text{ pW} = 1 \cdot 10^{-12} \text{ W}$, vgl. Tabelle 3.

Beispiel 2.3 f)

Man berechne den Schallleistungspegel für einen Lautsprecher, der eine Schallleistung von 1 W abstrahlt.

$$L_W = 10 \cdot \lg\left(\frac{1 \text{ W}}{1 \cdot 10^{-12} \text{ W}}\right) = 10 \cdot \lg(10^{12}) = 120 \text{ dB}$$

Bei Pegeln wird maximal eine Nachkommastelle angegeben.

Wenn die abgestrahlte Schallleistung der Bezugsschallleistung entspricht, folgt für den Schallleistungspegel (Gl. 14):

$$L_W = 10 \cdot \lg\left(\frac{1 \cdot 10^{-12} \text{ W}}{1 \cdot 10^{-12} \text{ W}}\right) = 10 \cdot \lg(10^0) = 10 \cdot \lg(1) = 0 \text{ dB} \quad (14)$$

In der Praxis liegen die Werte für den Schallleistungspegel zwischen 0 und 150 dB. Der im Beispiel 2.3 f) ermittelte Schallleistungspegel von 120 dB ist bereits ein relativ hoher Wert. Zum Vergleich: Die Schallleistungspegel von Motorkettensägen betragen typischerweise etwa 110 dB. Für Lautsprecher werden häufig deutlich höhere »Musikleistungen« angegeben als 1 W. Von der Schallleistung, die ein Lautsprecher bei der Musikwiedergabe in Wohnräumen zur Druckschwingungsanregung der Luft zur Verfügung stellt, weichen diese Angaben offensichtlich ab. Begriffe wie »Musikleistung« sind daher mit Vorsicht zu verwenden.

2.3.3 Schallintensitätspegel L_I

Der Schallintensitätspegel beschreibt die flächenbezogene Leistung, mit der eine Geräuschquelle die umgebende Luft zu Druckschwingungen anregt. Die Bezugsfläche folgt häufig dem zugrunde liegenden Schallausbreitungsmodell, vgl. Kapitel 2.2. Bei einer punktförmigen Geräuschquelle verteilt sich die abgegebene Schallleistung auf Kugeloberflächen, die mit zunehmendem Abstand zur Geräuschquelle größer werden. Die Schallleistung linienförmiger Geräuschquellen verteilt sich auf

zylindrische Flächen. Der Schallintensitätspegel ist daher vom Schallausbreitungsmodell und der angenommenen Entfernung der Geräuschquelle abhängig und keine unabhängige Gerätekonstante. In der Praxis wird üblicherweise mit zeitlich gemittelten Werten gearbeitet.

Die Berechnung des Schallintensitätspegels wird in der Gleichung 15 angegeben. Sie ergibt sich aus dem zehnfachen dekadischen Logarithmus des Quotienten der vorhandenen Schallintensität und der Bezugsschallintensität. Die Bezugsschallintensität beträgt $I_0 = 1 \text{ pW/m}^2 = 1 \cdot 10^{-12} \text{ W/m}^2$, vgl. Tabelle 3. Praktische Werte für den Schalleistungspegel liegen zwischen 0 und 140 dB.

$$L_I = 10 \cdot \lg \frac{I}{I_0} \text{ [dB]} \quad (15)$$

2.3.4 Schalldruckpegel L

Der Schalldruckpegel ist die bedeutendste bauakustische Größe und beschreibt die lokale Wirkung eines sich ausbreitenden Luftschallfeldes. Er wird durch das menschliche Ohr wahrgenommen oder mit Mikrofonen gemessen. Da der Schalldruckpegel im Freien und in großen Räumen entfernungsabhängig ist, wird zur Bewertung einer Geräuschquelle eine Abstandsangabe benötigt.

Wie im Kapitel 2.1 beschrieben, ist die potenzielle Energie einer Schallwelle proportional zum Quadrat des Schalldruckes. Zur Vereinfachung von Umrechnungen zwischen den als Pegel angegebenen akustischen Größen wurde der Schalldruckpegel als zehnfacher Logarithmus des Quotienten des Quadrates von Schalldruck und Bezugsschalldruck definiert (Gl. 16). Durch das Quadrieren des Schalldrucks wird der Schalldruckpegel zu einer Größe, die mit dem Schalleistungspegel und dem Schallintensitätspegel verglichen werden kann. Da alle drei Pegelgrößen Energieverhältnisse beschreiben, werden sie in der Praxis auch als »energetische« Größen bezeichnet. Für den Schalldruckpegel trifft dieses nur durch das Quadrieren zu, da der Schalldruck selbst eine Schallfeldgröße ist.

Der Bezugsschalldruck beträgt $p_0 = 20 \text{ } \mu\text{Pa} = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$ (Tabelle 3).

$$L = 10 \cdot \lg \frac{p^2}{p_0^2} = 20 \cdot \lg \frac{p}{p_0} \text{ [dB]} \quad (16)$$

In der Praxis wird die Schreibweise $20 \cdot \lg(p/p_0)$ bevorzugt, um das Quadrieren im Logarithmus zu vermeiden. Der Schalldruckpegel liegt in der Praxis zwischen 0 und 140 dB. Ein Schalldruckpegel von 0 dB bedeutet nicht, dass kein Schall vorhanden ist. Er beschreibt ein sehr leises Geräusch im Bereich der Hörschwelle des menschlichen Ohrs. Bei einem Schalldruckpegel von 120 dB, entsprechend einem