

Wolfgang M. Willems  
Kai Schild  
Simone Dinter

**Vieweg**  
**Handbuch Bauphysik**  
**Teil 2**

**Aus dem Programm**  
**Bauwesen**

**Sichtbeton-Planung**

von J. Schulz

**Architektur der Bauschäden**

von J. Schulz

**Vieweg Handbuch Bauphysik Teil 1**

von W. M. Willems, S. Dinter und K. Schild

**Vieweg Handbuch Bauphysik Teil 2**

von W. M. Willems, S. Dinter und K. Schild

**Bausanierung**

von M. Stahr (Hrsg.)

**Estriche**

von H. Timm

**Bauentwurfslehre**

von E. Neufert

**Hinzunehmende Unregelmäßigkeiten**

von R. Oswald und R. Abel

Wolfgang M. Willems  
Kai Schild  
Simone Dinter

# **Vieweg Handbuch Bauphysik Teil 2**

**Schall- und Brandschutz,  
Fachwörterglossar deutsch-  
englisch, englisch-deutsch**

Mit 84 Abbildungen und 209 Tabellen



Bibliografische Information Der Deutschen Nationalbibliothek  
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der  
Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über  
<<http://dnb.d-nb.de>> abrufbar.

1. Auflage August 2006

Alle Rechte vorbehalten

© Friedr. Vieweg & Sohn Verlag | GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden 2006

Lektorat: Günter Schulz / Karina Danulat

Der Vieweg Verlag ist ein Unternehmen von Springer Science+Business Media  
[www.vieweg.de](http://www.vieweg.de)



Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Umschlaggestaltung: Ulrike Weigel, [www.CorporateDesignGroup.de](http://www.CorporateDesignGroup.de)

Druck und buchbinderische Verarbeitung: Wilhelm & Adam, Heusenstamm

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier.

Printed in Germany

ISBN-10 3-8348-0188-7

ISBN-13 978-3-8348-0188-3

# Vorwort

Nun ist es also vollbracht! Nach mehr als eineinhalb Jahren der Bearbeitung und nachdem dieses Buch zeitweise zum unfreiwilligen Mittelpunkt unseres Lebens wurde, liegt nun ein Werk vor, welches mit etwa 1200 Seiten Umfang in zwei Teilen sicherlich ohne Übertreibung als das umfangreichste Buch zum Thema Bauphysik bezeichnet werden darf.

Das Fachgebiet der Bauphysik hat sich in weniger als 20 Jahren von einem kleinen übersichtlichen Arbeitsbereich zu einem nahezu unüberschaubaren und in einigen Bereichen sicherlich auch übernormten Fachgebiet gewandelt. Um so wichtiger ist es, das es einen Platz gibt, an dem der bauphysikalisch tätige Praktiker Hilfe für seine tägliche Arbeit erwarten kann. Diesen Platz will dieses Buch einnehmen. Hintergründe und Verfahren werden erläutert und durch Beispiele und Ablaufschemata greifbar gemacht. Umfangreiche Kennwertsammlungen zu Bauausführungen, Baustoffen und Bauprodukten geben in vielen Fällen ausreichend Hinweise für die fallbezogene Problemlösung. Dieses Buch wendet sich daher sowohl an Ingenieure, Architekten sowie an Energieberater als auch an Studenten der entsprechenden Fachrichtungen: Eben an alle, die sich mit dem Fachgebiet Bauphysik vertieft beschäftigen müssen oder wollen.

Ein solches Buch kann nicht ohne die Hilfe vieler Beteiligten gelingen. Daher sei an dieser Stelle zunächst Frau Dipl.-Ing. Diana Stricker für unzählige Recherchen, die Bearbeitung des Wörterbuches und des Stichwortregisters gedankt. Des Weiteren geht unser Dank an Frau cand. ing. Susanne Spliesgardt, Frau cand. ing. Antje Gerhardt, Frau Jennifer Bausch, Frau Stefanie Blanke, Frau Julia Rottländer und Frau Irina Krawtschenko. Die Fülle an Abbildungen wäre ohne ihre zeichnerische Gabe nicht realisierbar gewesen. Nicht vergessen werden soll auch unser Dank an Herrn Dr.-Ing. Stefan Völkner für seine Anregungen und Korrekturen sowie an Herrn Dipl.-Ing. Rolf Stricker für seine Hilfe bei der Bearbeitung der Wörterbuches.

Ein ganz besonderer Dank gebührt selbstverständlich unseren Familien, die in letzter Zeit nicht immer die ihnen zustehende Aufmerksamkeit bekommen konnten. Vielen Dank also Susanne, Julian, Bianca und Ralf!

Ein derart umfangreiches Werk wird realistischer Weise, auch trotz größter Bemühungen, nicht umfassend und fehlerfrei sein. Daher bitten wir Sie, unsere Leser, darum, uns Anregungen, Kritik und Fehler mitzuteilen, auf dass wir diese in einer zweiten Auflage berücksichtigen können.

Mai 2006

Wolfgang Willems

Kai Schild

Simone Dinter

# Inhaltsverzeichnis

## TEIL 2

### 7 Schallausbreitung

7.1	<b>Physikalische Größen, Formelzeichen, Einheiten</b> .....	7.1
7.2	<b>Physikalische Grundlagen der Schallausbreitung</b> .....	7.9
7.2.1	Schallschwingung .....	7.9
7.2.2	Schallgeschwindigkeiten .....	7.13
7.2.3	Definition unterschiedlicher Schallpegel .....	7.13
	<i>Allgemeines</i> .....	7.13
	<i>Schallschnelle-Pegel</i> .....	7.14
	<i>Schallwellenwiderstand</i> .....	7.14
	<i>Schallintensität und Schallintensitätspegel</i> .....	7.14
	<i>Schall-Leistung und Schall-Leistungspegel</i> .....	7.15
	<i>Schalldruckpegel</i> .....	7.15
	<i>Addition und Subtraktion von Schallpegeln</i> .....	7.16
	<i>Mittelung zeitlich veränderlicher Schallpegel</i> .....	7.17
	<i>Mittelung örtlicher veränderlicher Schallpegel</i> .....	7.18
7.2.4	Lautstärkeempfinden und Frequenzbewertung .....	7.18
7.2.5	Schallausbreitung .....	7.21
	<i>Punktschallquellen</i> .....	7.21
	<i>Linien-schallquellen</i> .....	7.22
7.3	<b>Immissionsgrenzwerte bei Schallausbreitung im Freien</b> .....	7.23
7.3.1	Allgemeines .....	7.23
7.3.2	Zusammenstellung von Anforderungen und Orientierungswerten .....	7.24
	<i>Anforderungen nach TA Lärm</i> .....	7.24
	<i>Anforderungen nach Sportanlagenlärmschutzverordnung</i> .....	7.27
	<i>Anforderungen nach der Verkehrslärmschutzverordnung</i> .....	7.29
	<i>Orientierungswerte nach DIN 18005-1 Bbl. 1</i> .....	7.30
7.4	<b>Ermittlung von Schallimmissionen</b> .....	7.31
7.4.1	Allgemeines .....	7.31
7.4.2	Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm (TA Lärm) .....	7.32
	<i>Ermittlung der Geräuschimmissionen aus Vorbelastung durch Messung</i> .....	7.32
	<i>Ermittlung der Geräuschimmissionen aus Zusatzbelastung mit der überschlägigen Prognose</i> .....	7.34
	<i>Ermittlung der Geräuschimmissionen aus Zusatzbelastung mit der detaillierten Prognose</i> .....	7.37
7.4.3	Verkehrslärmschutzverordnung (16. BImSchV) .....	7.38
	<i>Berechnung der Beurteilungspegel an Straßen</i> .....	7.38

	<i>Berechnung der Beurteilungspegel bei Schienenwegen</i> .....	7.44
7.4.4	DIN 18005-1 .....	7.49
	<i>Allgemeines</i> .....	7.49
	<i>Richtwerte zur Einhaltung unterschiedlicher Beurteilungspegel</i> .....	7.50
	<i>Verweise auf Regelwerke</i> .....	7.51
	<i>Vereinfachte Schätzverfahren für Verkehrsanlagen (Diagramme)</i> .....	7.52
7.4.5	DIN ISO 9613-2 .....	7.56
	<i>Anwendungsbereich</i> .....	7.56
	<i>Randbedingungen</i> .....	7.58
	<i>Rechenvorgaben</i> .....	7.59
	<i>Richtwirkungskorrektur</i> .....	7.61
	<i>Dämpfung - Oktavbanddämpfung</i> .....	7.63
	<i>Dämpfung - Geometrische Ausbreitung</i> .....	7.63
	<i>Dämpfung - Luftabsorption</i> .....	7.64
	<i>Dämpfung - Bodeneffekt</i> .....	7.65
	<i>Dämpfung - Vereinfachtes Verfahren für den Bodeneffekt</i> .....	7.69
	<i>Dämpfung - Abschirmung</i> .....	7.70
	<i>Dämpfung - Zusätzliche Dämpfungsarten</i> .....	7.75
	<i>Meteorologische Korrektur</i> .....	7.77
7.4.6	VDI 2714 .....	7.79
7.4.7	VDI 2571 .....	7.79
	<i>Allgemeines</i> .....	7.79
	<i>Ermittlung des Gesamtschalldruckpegels am Immissionsort mit frequenzabhängigen Größen</i> .....	7.81
	<i>Ermittlung des Gesamtschalldruckpegels am Immissionsort mit A-bewerteten Größen</i> .....	7.86
7.5	<b>Literatur</b> .....	7.88

## **8 Bauakustik**

<b>8.1</b>	<b>Grundlagen</b> .....	8.1
8.1.1	Physikalische Größen, Formelzeichen, Einheiten .....	8.1
8.1.2	Kapitel Aufbau, Begriffsbestimmungen und kennzeichnende Größen ...	8.4
8.1.3	Grundlagen des Luftschallschutzes .....	8.9
	<i>Schalldämmung</i> .....	8.9
	<i>Schallübertragungswege</i> .....	8.12
	<i>Bewertung des Schalldämm-Maßes</i> .....	8.12
	<i>Spektrum-Anpassungswerte</i> .....	8.14
	<i>BERGERSches Massegesetz</i> .....	8.18
	<i>Einschalige Bauteile</i> .....	8.19
	<i>Mehrschalige Bauteile</i> .....	8.22
8.1.4	Grundlagen des Trittschallschutzes .....	8.24
	<i>Schalldämmung</i> .....	8.24
	<i>Schallübertragungswege</i> .....	8.25

	<i>Bewertung des Norm-Trittschallpegels</i> .....	8.26
	<i>Spektrum-Anpassungswerte</i> .....	8.27
<b>8.2</b>	<b>Luftschallschutz</b>	
	<b>(Teil A: Emissionsquelle außerhalb des Gebäudes)</b> .....	8.28
8.2.1	Anforderungen an die Luftschalldämmung von Außenbauteilen .....	8.28
8.2.2	Nachweisverfahren nach DIN 4109 Bbl. 1 .....	8.30
	<i>Ermittlung des maßgeblichen Außenlärmpegels</i> .....	8.30
	<i>Ermittlung des resultierenden bewerteten Luftschalldämm-Maßes</i> ....	8.34
	<i>Nachweisführung</i> .....	8.34
<b>8.3</b>	<b>Luftschallschutz</b>	
	<b>(Teil B: Emissionsquelle innerhalb des Gebäudes)</b> .....	8.34
8.3.1	Anforderungen an die Luftschalldämmung zum Schutz von Aufenthaltsräumen gegenüber Schallübertragung .....	8.34
8.3.2	Nachweisverfahren nach DIN 4109 Bbl. 1 für Gebäude in Massivbauweise .....	8.42
	<i>Flankierende Bauteile - Vorausgesetzte Randbedingungen</i> .....	8.42
	<i>Flankierende Bauteile - Korrekturwerte bei biegesteifen trennenden Bauteilen</i> .....	8.42
	<i>Flankierende Bauteile - Korrekturwerte bei biegeweichen trennenden Bauteilen</i> .....	8.43
	<i>Flankierende Bauteile - Korrekturwert bei Vorsatzschalen und biegeweichen flankierenden Bauteilen</i> .....	8.44
	<i>Nachweisführung</i> .....	8.45
8.3.3	Nachweisverfahren nach DIN 4109 Bbl. 1 für Gebäude in Skelett- oder Holzbauweise .....	8.45
	<i>Voraussetzungen</i> .....	8.45
	<i>Ermittlung der Rechenwerte - Trennendes Bauteil</i> .....	8.45
	<i>Ermittlung der Rechenwerte - Flankierende Bauteile</i> .....	8.46
	<i>Vereinfachte Nachweisführung</i> .....	8.47
	<i>Genauere Nachweisführung</i> .....	8.47
8.3.4	Vereinfachter Nachweis der Luftschalldämmung von Bauteilen zwischen „besonders lauten“ und schutzbedürftigen Räumen .....	8.47
<b>8.4</b>	<b>Luftschallschutz</b>	
	<b>(Teil C: Emissionen aus dem Gebäude in's Freie)</b> .....	8.49
<b>8.5</b>	<b>Kennwerte für den Luftschallschutz</b> .....	8.49
8.5.1	Bewertetes Luftschalldämm-Maß massiver Bauteile .....	8.49
	Rechenwerte der Rohdichten nach DIN 4109 Bbl. 1 .....	8.49
	<i>Einschalige, biegesteife Wand</i> .....	8.51
	<i>Einschalige, biegesteife Wand mit Innendämmung</i> .....	8.53
	<i>Einschalige, biegesteife Wand mit Wärmedämmverbundsystem</i> .....	8.59
	<i>Zweischalige Haustrennwände aus zwei schweren, biegesteifen Schalen mit durchgehender Trennfuge</i> .....	8.62
	<i>Mehrschalige massive Wände mit mindestens einer biegesteifen Schale</i> .....	8.64

	<i>Massive Trenndecken</i> .....	8.66
8.5.2	Flankenschalldämm-Maß massiver Bauteile .....	8.69
	<i>Einschalige massive flankierende Bauteile von Trennwänden</i> .....	8.69
	<i>Massivdecken mit Unterdecken als flankierende Bauteile über</i> <i>Trennwänden</i> .....	8.70
	<i>Massivdecken mit schwimmendem Estrich als flankierende</i> <i>Bauteile unter Trennwänden</i> .....	8.74
	<i>Massive biegesteife Wände mit biegeweicher Vorsatzschale</i> .....	8.75
8.5.3	Bewertetes Luftschalldämm-Maß von Bauteilen in Holzbauweise .....	8.79
	<i>Außenwände</i> .....	8.79
	<i>Flachdächer</i> .....	8.108
	<i>Geneigte Dächer</i> .....	8.110
	<i>Decken</i> .....	8.121
	<i>Trennwände</i> .....	8.137
8.5.4	Flankenschalldämm-Maß von Bauteilen in Holzbauweise .....	8.149
	<i>Holzbalkendecken</i> .....	8.149
	<i>Wände</i> .....	8.151
8.5.5	Bewertetes Luftschalldämm-Maß von Bauteilen in Stahlleichtbauweise .....	8.153
	<i>Außenwände</i> .....	8.153
	<i>Flachdächer</i> .....	8.164
	<i>Trennwände</i> .....	8.172
8.5.6	Flankenschalldämm-Maß von Bauteilen in Stahlleichtbauweise .....	8.197
	<i>Wände</i> .....	8.197
8.5.7	Bewertetes Luftschalldämm-Maß von Fenstern, Türen, Toren, Rolladenkästen .....	8.199
<b>8.6</b>	<b>Trittschallschutz</b> .....	8.202
8.6.1	Anforderungen an die Trittschalldämmung zum Schutz von Aufenthaltsräumen gegenüber Schallübertragung .....	8.202
8.6.2	Nachweis des Trittschallschutzes nach DIN 4109 Bbl. 1 für Gebäude in Massivbaubauweise .....	8.213
	<i>Voraussetzungen</i> .....	8.213
	<i>Anordnung der Räume</i> .....	8.213
	<i>Ermittlung der Rechenwerte für Massivdecken</i> .....	8.214
	<i>Ermittlung der Rechenwerte für Holzbalkendecken</i> .....	8.215
	<i>Nachweis</i> .....	8.215
8.6.3	Nachweis des Trittschallschutzes nach DIN 4109 Bbl. 1 für Gebäude in Skelett- und Holzbaubauweise .....	8.215
	<i>Ermittlung der Rechenwerte</i> .....	8.215
	<i>Nachweis</i> .....	8.215
<b>8.7</b>	<b>Kennwerte für den Trittschallschutz</b> .....	8.215
8.7.1	Bewerteter Normtrittschallpegel massiver Bauteile .....	8.215
	<i>Massive Trenndecken</i> .....	8.215
	<i>Massive Treppen (Läufe und Podeste)</i> .....	8.221

8.7.2	Bewerteter Normtrittschallpegel von Bauteilen in Holzbauweise .....	8.224
<b>8.8</b>	<b>Haustechnische Anlagen</b> .....	8.244
8.8.1	Anforderungen an den Schutz vor Geräuschen aus haustechnischen Anlagen und Gewebetrieben .....	8.244
8.8.2	Anforderungen an Armaturen und Geräte der Wasserinstallation ....	8.245
8.8.3	Nachweis der Anforderungen .....	8.246
<b>8.9</b>	<b>Literatur</b> .....	8.247

## 9 Raumakustik

<b>9.1</b>	<b>Physikalische Größen, Formelzeichen, Einheiten</b> .....	9.1
<b>9.2</b>	<b>Grundlagen</b> .....	9.3
9.2.1	Ziele der Raumakustik .....	9.3
9.2.2	Sicherstellung der Verständlichkeit .....	9.3
9.2.3	Schallabsorptionsgrad .....	9.4
9.2.4	Äquivalente Schallabsorptionsfläche .....	9.5
9.2.5	Nachhallzeit .....	9.5
<b>9.3</b>	<b>Technische Absorber</b> .....	9.6
9.3.1	Differenzierungen.....	9.6
9.3.2	Poröse Absorber .....	9.6
9.3.3	Plattenresonatoren.....	9.9
9.3.4	Helmholtz-Resonator .....	9.10
9.3.5	Mikroperforierte Absorber .....	9.10
9.3.6	Kombinationen .....	9.11
<b>9.4</b>	<b>Anforderungen an die Nachhallzeiten</b> .....	9.12
<b>9.5</b>	<b>Schallreflexionen</b> .....	9.15
9.5.1	Allgemeines .....	9.15
9.5.2	Spiegelnde Reflexion .....	9.15
9.5.3	Diffuse Reflexion.....	9.17
9.5.4	Anordnung schallabsorbierender Flächen .....	9.19
	<i>Kleine Räume</i> .....	9.19
	<i>Mittelgroße Räume und kleine Hallen</i> .....	9.21
<b>9.6</b>	<b>Schallpegelminderung</b> .....	9.23
<b>9.7</b>	<b>Zusammenstellung der wichtigsten Schallabsorptionsgrade</b> .....	9.23
<b>9.8</b>	<b>Literatur</b> .....	9.47

## 10 Brandschutz

<b>10.1</b>	<b>Physikalische Größen, Formelzeichen, Einheiten</b> .....	10.1
<b>10.2</b>	<b>Anforderungen</b> .....	10.2

<b>10.3</b>	<b>Brandverhalten</b> .....	10.4
<b>10.4</b>	<b>Brandverlauf</b> .....	10.5
<b>10.5</b>	<b>Deutsches Klassifizierungssystem nach DIN 4102</b> .....	10.7
10.5.1	Überblick.....	10.7
10.5.2	DIN 4102-1.....	10.8
10.5.3	DIN 4102-2.....	10.9
10.5.4	DIN 4102-3.....	10.11
10.5.5	DIN 4102-4.....	10.12
<b>10.6</b>	<b>Europäisches Klassifizierungssystem nach DIN EN 13501</b> .....	10.12
10.6.1	Überblick.....	10.12
10.6.2	DIN EN 13501-1: Benennung des Brandverhaltens von Bauprodukten.....	10.12
10.6.3	Europäische Klassen und bauaufsichtliche Anforderungen.....	10.15
10.6.4	Prüfung nach DIN EN 13823: Der Single-Burning-Item (SBI)-Test ...	10.17
10.6.5	DIN EN 13501-2: Benennung des Feuerwiderstandes.....	10.18
	<i>Einheits-Temperaturzeitkurve (Brandphase nach dem Brandüberschlag)</i> .....	10.18
	<i>Langsame Beheizungskurve (Schwelbrand)</i> .....	10.19
	<i>Naturbrand</i> .....	10.19
	<i>Außen-Brand-Kurve</i> .....	10.19
	<i>Konstante Temperaturbeanspruchung</i> .....	10.20
	<i>Andere Beheizungskurven</i> .....	10.20
	<i>Klassifizierungskriterien</i> .....	10.20
	<i>Feuerwiderstandsklassen von Bauteilen</i> .....	10.22
<b>10.7</b>	<b>Zusammenstellung und Anwendung klassifizierter Baustoffe, Bauteile und Sonderbauteile nach DIN 4102-4</b> .....	10.23
10.7.1	Allgemeines.....	10.23
10.7.2	Betonbauweise.....	10.24
10.7.3	Mauerwerkbauweise.....	10.34
10.7.4	Holzbauweise.....	10.43
10.7.5	Stahlbauweise.....	10.53
<b>10.8</b>	<b>Literatur</b> .....	10.54
<b>11</b>	<b>Fachterminologie Deutsch ⇔ Englisch</b>	
11.1	Deutsch ⇔ Englisch.....	11.1
11.2	Englisch ⇔ Deutsch.....	11.47

# Inhaltsübersicht

## TEIL 1

### 1 Grundbegriffe und Berechnungshilfen

- 1.1 Einheiten-Umrechnungstafel
- 1.2 Griechisches Alphabet
- 1.3 Mathematische Grundlagen
- 1.4 Wärmedämmstoffe
- 1.5 Wärme- und feuchteschutztechnische Kennwerte
- 1.6 Wärme- und schalltechnische Kennwerte für Verglasungen
- 1.7 Formularvorlagen für Berechnungen nach EnEV
- 1.8 Literatur

### 2 Wärmeschutz

- 2.1 Physikalische Größen, Formelzeichen, Einheiten
- 2.2 Wärmeschutztechnische Begriffe
- 2.4 Wärmebilanzen
- 2.5 Wärmebrücken
- 2.6 Mindestanforderungen an den Wärmeschutz im Winter
- 2.7 Energiesparender Wärmeschutz – Energieeinsparverordnung
- 2.8 Wärmeübertragung über das Erdreich
- 2.9 Sommerlicher Wärmeschutz
- 2.10 Literatur

### T Farbtafeln

### 3 Wärmebrückenkatalog zu DIN 4108 Beiblatt 2 (01.04)

- 3.1 Allgemeines
- 3.2 Materialien und verwendete Kenngrößen
- 3.3 Monolithisches Mauerwerk
- 3.4 Außengedämmtes Mauerwerk
- 3.5 Außengedämmter Stahlbeton
- 3.6 Kerngedämmtes Mauerwerk
- 3.7 Holzbauart

- 3.8 Sonstige (Dachfenster, Gauben, Innenwand-Anschlüsse)
- 3.9 Literatur

## **4 Raumklima/Behaglichkeit**

- 4.1 Einführung
- 4.2 Wertepaar: Raumlufttemperatur vs. Oberflächentemperaturen
- 4.3 Raumlufttemperatur vs. Luftfeuchte
- 4.4 Raumlufttemperatur vs. Luftgeschwindigkeit
- 4.5 Behaglichkeitskriterien nach DIN 1946-2 (VDI-Lüftungsregeln)
- 4.6 Analytische Bestimmung der thermischen Behaglichkeit
- 4.7 Literatur

## **5 Feuchteschutz**

- 5.1 Physikalische Größen, Formelzeichen, Einheiten
- 5.2 Feuchteschutztechnische Begriffe
- 5.3 Feuchtetransport in Baustoffen
- 5.4 Schlagregenschutz
- 5.5 Klimabedingter Feuchteschutz nach DIN 4108-3
- 5.6 Klimabedingter Feuchteschutz nach DIN EN ISO 13788
- 5.8 Bauwerksabdichtungen nach DIN 18195
- 5.9 Literatur

## **6 Luftbedarf und Lüftung**

- 6.1 Luftbedarf
- 6.2 Luftdichtheit
- 6.3 Freie Lüftung
- 6.4 Luftführung bei mechanischen Lüftungsanlagen
- 6.5 Mechanische Wohnungslüftung
- 6.6 Wärmetauscher
- 6.7 Zustandsänderungen feuchter Luft (h-x-Diagramm)
- 6.8 Literatur

## 7 Schallausbreitung

### 7.1 Physikalische Größen, Formelzeichen, Einheiten

Tabelle 7.1-1 Physikalische Größen, Formelzeichen, Einheiten

	1	2	3
1	Physikalische Größe	Formelzeichen	Einheit
2	Abschirmmaß für das Außenbauteil $k$ bzw. für die ins Freie abstrahlenden Einzelschallquelle $j$ (Abschirmung durch das Gebäude selbst)	$\Delta L_{Z1,kj}$	dB
3	Abschirmmaß für das Außenbauteil $k$ der ins Freie abstrahlenden Einzelschallquelle $j$ (Abschirmung durch andere Hindernisse)	$\Delta L_{Z2,kj}$	dB
4	Abschirmmaß für jedes Oktavband	$D_Z$	dB
5	Absorptionskoeffizient der Luft für Oktavbänder	$\alpha$	dB/km
6	Abstand	$d$	m
7	Abstand des Immissionsortes vom Emissionsort	$s_m$	m
8	Abstand vom Schwerpunkt der Fläche $S_k$ zum Immissionsort in der Nachbarschaft	$s_{m,k}$	m
9	Abstand von (zweiter) Beugungskante zu Empfänger (Aufpunkt)	$d_{sr}$	m
10	Abstand von der ins Freie abstrahlenden Einzelschallquelle $j$ zum Immissionsort in der Nachbarschaft	$s_{m,j}$	m
11	Abstand von Schallquelle zu Empfänger	$d$	m
12	Abstand zwischen Schallquelle und Immissionsort, auf die Bodenebene projizierter	$d_p$	m
13	Abstand von Schallquelle zur (ersten) Beugungskante	$d_{ss}$	m
14	Abstand zwischen Emissionsort (0,5 m über der Mitte des betrachteten Fahrstreifens) und maßgebendem Immissionsort	$s_{\perp}$	m
15	Abstand zwischen Emissionsort (Achse des betrachteten Gleises in Höhe der Schienenoberkante) und maßgebendem Immissionsort	$s_{\perp}$	m
16	Abstand zwischen Schallquelle und Empfänger parallel zum Schallschirm	$a$	m
17	Abstand zwischen Schallquelle und Immissionsort	$d$	m
18	Abstand von Schallquelle zu Empfänger, auf die Bodenebene projizierter	$d_p$	m

19	Abstandmaß des Außenbauteils $k$ bzw. der ins Freie abstrahlenden Einzelschallquelle $j$	$\Delta L_{s,kj}$	dB
20	Anteil der Fahrzeuge mit Scheibenbremsen des gesamten Zuges einer Zugklasse	$\rho$	%
21	Anzahl der Beurteilungspegel	$n$	-
22	Anzahl der gewählten Teilzeiten	$N$	-
23	Anzahl der Schallquellen mit Ausbreitungswegen	$n$	-
24	Anzahl der Takte (Taktlänge 5 Sekunden)	$k$	-
25	A-Schalldruckpegel der Maschine $i$ , über die Messfläche S gemittelter	$L_{A,mittel,i}$	dB(A)
26	Ausdehnung einer Anzahl von Punktschallquellen	$H_{Max}$	m
27	Bebauungsdichte	$B$	%
28	Beurteilungspegel	$L_r$	dB(A)
29	Beurteilungspegel der Gesamtbelastung, der sich nach Inbetriebnahme der Anlage einstellt, maßgeblicher	$L_{G,r}$	dB(A)
30	Beurteilungspegel der Messung $j$	$L_{r,j}$	dB(A)
31	Beurteilungspegel der Verkehrsvorgänge auf dem Teil $k$ des Betriebsgrundstückes (= Schallquelle $k$ ) für die Teilzeit $j$	$L_{r,Trf,kj}$	dB(A)
32	Beurteilungspegel der Vorbelastung, maßgeblicher	$L_{V,r}$	dB(A)
33	Beurteilungspegel der Zusatzbelastung aus allen Teilzeiten $T_j$ , maßgeblicher	$L_{Z,r}$	dB(A)
34	Beurteilungspegel des Fahrstreifens $i$ bei Nacht	$L_{r,N,i}$	dB(A)
35	Beurteilungspegel des Fahrstreifens $i$ bei Tage	$L_{r,T,i}$	dB(A)
36	Beurteilungspegel eines Gleises bei Nacht	$L_{r,N,i}$	dB(A)
37	Beurteilungspegel eines Gleises bei Tage	$L_{r,T,i}$	dB(A)
38	Beurteilungspegel für jeden maßgeblichen Immissionsort der Anlage für die Teilzeit $j$ , berechnet aus den Pegeln und Einwirkzeiten aller Schallquellen $k$	$L_{Aeq,j}$	dB(A)
39	Bezugsabstand ( $d_0 = 1,0$ m)	$d_0$	m
40	Bezugsfläche	$S_0$	m <sup>2</sup>
41	Bezugsfläche ( $S_0 = 1,0$ m <sup>2</sup> )	$S_0$	m <sup>2</sup>
42	Bezugswert der Schallintensität ( $I_0 = 10^{-12}$ W/m <sup>2</sup> )	$I_0$	W/m <sup>2</sup>
43	Bezugswert der Schall-Leistung	$P_0$	W
44	Bezugswert der Schall-Leistung ( $W_0 = 10^{-12}$ W)	$W_0$	W
45	Bezugswert der Schallschnelle ( $v_0 = 5 \cdot 10^{-8}$ m/s)	$v_0$	m/s

46	Bezugswert des Schalldrucks ( $p_0 = 20 \mu\text{Pa}$ )	$p_0$	$\mu\text{Pa}$
47	Bodenfaktor	$G_{(s,r,m)}$	-
48	Dämpfung aufgrund des Bodeneffektes	$A_{gr}$	dB
49	Dämpfung aufgrund geometrischer Ausbreitung	$A_{div}$	dB
50	Dämpfung aufgrund verschiedener anderer Effekte	$A_{misc}$	dB
51	Dämpfung aufgrund von Abschirmung	$A_{bar}$	dB
52	Dämpfung aufgrund von Luftabsorption	$A_{atm}$	dB
53	Dämpfungsterm für Bebauung	$A_{hous}$	dB(A)
54	Dämpfungsterm für Bewuchs	$A_{fol}$	dB
55	Dämpfungsterm für den Empfängerbereich	$A_r$	dB
56	Dämpfungsterm für den Mittelbereich	$A_m$	dB
57	Dämpfungsterm für den Quellbereich	$A_s$	dB
58	Dämpfungsterm für Industriegelände	$A_{site}$	dB
59	Dauerschalldruckpegel bei Mitwind, äquivalenter A-bewerteter	$L_{AT}(DW)$	dB(A)
60	Dauerschallpegel, äquivalenter	$L_{eq}$	dB
61	Druck	$p$	Pa, hPa
62	Durchschnitt der täglichen Verkehrstärke	$DTV$	Kfz/Tag
63	Einwirkzeit der Schallquelle $k$ in der Teilzeit $j$	$T_{E,k,j}$	h
64	Entfernung zwischen der ins Freie abstrahlenden Einzelschallquelle $j$ und dem Messort	$s_{0,j}$	m
65	Faktor zur Berücksichtigung statistischer Daten für Windgeschwindigkeit, Windrichtung, Temperaturgradienten	$C_0$	dB
66	Faktor zur Beugungsdifferenzierung	$C_3$	
67	Fassadendichte	$\rho$	%
68	Fläche	$S$	$\text{m}^2$
69	Fläche	$F$	$\text{m}^2$
70	Fläche des Außenbauteils $k$	$S_k$	$\text{m}^2$
71	Fläche des Außenbauteils $k$ der ins Freie abstrahlenden Einzelschallquelle $j$	$S_j$	$\text{m}^2$
72	Fläche des schallübertragenden Bauteils	$S$	$\text{m}^2$
73	Frequenz	$f$	Hz
74	Gesamtschalldruckpegel in der Nachbarschaft am Immissionsort	$L_\Sigma$	dB

75	Gesamtschalldruckpegel in der Nachbarschaft am Immissionsort, A-bewerteter	$L_{\Sigma A}$	dB(A)
76	Höhe der Schallquelle (Index s) bzw. des Immissionsortes (Index r)	$h_{s,r}$	m
77	Höhe der Schallquelle über dem Boden	$h_s$	m
78	Höhe des Empfängers über dem Boden	$h_r$	m
79	Höhe des Schallausbreitungsweges über dem Boden, mittlere	$h_m$	m
80	Hüllfläche	$S$	m <sup>2</sup>
81	Index zur Angabe der betrachteten Oktavbandmittenfrequenz von 63 bis 8000 Hz	$j$	
82	Index zur Identifizierung der Schallquelle $i$ mit Ausbreitungsweg $j$	$i$	
83	Korrektur für die Zuglänge $l$	$D_{l,v}$	dB(A)
84	Korrektur für Steigungen und Gefälle	$D_{Stg}$	dB(A)
85	Korrektur für unterschiedl. Straßenoberflächen	$D_{StrO}$	dB(A)
86	Korrektur für unterschiedliche zulässige Höchstgeschwindigkeiten	$D_V$	dB(A)
87	Korrektur zur Berücksichtigung der Fahrzeugart	$D_{Fz}$	dB(A)
88	Korrektur zur Berücksichtigung unterschiedlicher Fahrbahnen	$D_{Fb}$	dB(A)
89	Korrektur, meteorologische	$C_{met}$	dB(A)
90	Korrekturfaktor für meteorologische Einflüsse	$K_{met}$	
91	Korrekturwert von -5dB(A) zur Berücksichtigung der geringeren Störwirkung des Schienenverkehrs	$S$	dB(A)
92	Korrekturwerte für die A-Bewertung	$\Delta L_A$	dB
93	Korrekturwerte für die genormte A-Bewertung	$A_{f(j)}$	dB
94	Kreisfrequenz	$\omega$	rad/s
95	Langzeit-Mittelungspegel, A-bewerteter	$L_{AT}(LT)$	dB(A)
96	Lkw-Anteil (über 2,8 t zulässiges Gesamtgewicht), maßgebender	$p$	%

97	Luftschalldämm-Maß des schallübertragenden Außenbauteils $k$ des schall-emittierenden Gewerbe- oder Industriegebäudes , bewertetes	$R_{w,k}$ bzw. $R'_{w,k}$	dB
98	Luftschalldämm-Maß, bewertetes	$R'_w$	dB(A)
99	Maximalpegel des Schalldruckpegels zur Beurteilung von Geräuschspitzen, A-bewerteter	$L_{AFmax}$	dB(A)
100	Messfläche	$S_i$	m <sup>2</sup>
101	Messflächen-Schalldruckpegel	$L'_p$	dB
102	Mittelungsdauer	$T$	s
103	Mittelungspegel für den Tag	$L_{m,T}^{(25)}$	dB(A)
104	Mittelungspegel für die Nacht	$L_{m,N}^{(25)}$	dB(A)
105	Mittelungspegel zur Beurteilung der Geräuschimmissionen, A-bewerteter	$L_{Aeq}$	dB(A)
106	Mittelungspegel, örtlicher	$L'$	dB
107	Mittelungspegel, zeitlicher	$L_m$	dB
108	Nachhallzeit im Maschinenraum	$T$	s
109	Oktavbanddämpfung	$A$	dB
110	Oktavband-Dauerschalldruckpegel bei Mitwind, äquivalenter	$L_{fT}(DW)$	dB
111	Oktavband-Schall-Leistungspegel, bezogen auf eine Bezugsschall-Leistung von 1 pW	$L_W$	dB
112	Partial-Dämpfungsterm 1	$A_{hous,1}$	dB(A)
113	Partial-Dämpfungsterm 2	$A_{hous,2}$	dB(A)
114	Pegeländerung durch Boden- und Meteorologiedämpfung	$D_{BM}$	dB(A)
115	Pegeländerung durch topographische Gegebenheiten, bauliche Maßnahmen und Reflexionen	$D_B$	dB(A)
116	Pegeländerung durch unterschiedliche Abstände $s_{\perp}$ ohne Boden- und Meteorologiedämpfung	$D_{S_{\perp}}$	dB(A)
117	Periode	$T$	s
118	Proportionalitätsfaktor für den Schirmwert	$C_2$	
119	Raumwinkel	$\Omega$	sr
120	Raumwinkelmaß	$K_0$	dB(A)

121	Richtwirkungskorrektur	$D_C$	dB
122	Richtwirkungsmaß bei Eigenabschirmung des Gebäudes	$D_I$	dB(A)
123	Richtwirkungsmaß der Punktschallquelle	$D_I$	dB
124	Richtwirkungsmaß zur Berücksichtigung einer Schallausbreitung in Raumwinkeln $\Omega \leq 4\pi$	$D_\Omega$	dB
125	Richtwirkungsmaß, für das vereinfachte Verfahren korrigiertes	$D_\Omega$	dB
126	Rohdichte	$\rho$	kg/m <sup>3</sup>
127	Ruhedruck ( $p_{atm} = 1013$ hPa), mittlerer atmosphärischer	$p_{atm}$	hPa
128	Schalldruck, effektiver	$p_{eff}$	Pa
129	Schalldruckpegel der ins Freie abstrahlenden Einzelschallquelle $j$ am Immissionsort	$L_{s,j}$	dB
130	Schalldruckpegel der ins Freie abstrahlenden Einzelschallquelle $j$ in einem beliebigen Abstand $s_{0,j}$	$L_{A,j}$	dB(A)
131	Schalldruckpegel des Außenbauteils $k$ in der Nachbarschaft am Immissionsort	$L_{s,k}$	dB
132	Schalldruckpegel im Innern des Gebäudes, Mittlerer A-bewerteter	$L_I$	dB(A)
133	Schalldruckpegel im Maschinenraum	$L_{IA}$	dB(A)
134	Schalldruckpegeldifferenz	$\Delta L_p$	dB
135	Schallgeschwindigkeit	$c$	m/s
136	Schallintensität	$I$	W/m <sup>2</sup>
137	Schallintensitätspegel	$L_I$	dB
138	Schall-Leistung	$W$	W
139	Schall-Leistung, von der Maschine $i$ abgestrahlte	$P_i$	W
140	Schall-Leistungspegel	$L_W$	dB
141	Schall-Leistungspegel aller Maschinen, resultierender	$L_{WA}$	dB(A)
142	Schall-Leistungspegel der ins Freie abstrahlenden Einzelschallquelle $j$	$L_{W,j}$	dB
143	Schall-Leistungspegel der ins Freie abstrahlenden Einzelschallquelle $j$	$L_{WA,j}$	dB(A)
144	Schall-Leistungspegel der Maschine $i$	$L_{W,i}$	dB

145	Schall-Leistungspegel der Maschine $i$	$L_{WA,i}$	dB(A)
146	Schall-Leistungspegel der Schallquelle $k$ in der Teilzeit $j$ , Mittlerer A-bewerteter	$L_{Aeq,k,j}$	dB(A)
147	Schall-Leistungspegel Pegel kurzzeitiger Geräuschspitzen der Schallquelle $k$ , A-bewerteter maximaler	$L_{AFmax,k}$	dB(A)
148	Schall-Leistungspegel Pegel kurzzeitiger Geräuschspitzen der Anlage, A-bewerteter maximaler	$L_{AFmax}$	dB(A)
149	Schall-Leistungspegel, von Teilflächen der Außenhaut eines Gebäudes abgestrahlter mittlerer	$L_{WAeq}$	dB(A)
150	Schallschnelle	$v$	m/s
151	Schallschnellepegel	$L_v$	dB
152	Strecke	$Z$	m
153	Taktmaximal-Mittelungspegel zur Ermittlung des Zuschlags für Impulshaltigkeit des zu beurteilenden Geräusches, A-bewerteter	$L_{AFTeq}$	dB(A)
154	Taktmaximalpegel mit Taktlänge von 5 s, A-bewerteter	$L_{AFT(t)}$	dB(A)
155	Teildauer	$T_i$	s
156	Teilweglänge im Bereich der Schallquelle	$d_1$	m
157	Teilweglänge im Bereich des Empfängers	$d_2$	m
158	Teilzeit $j$	$T_j$	h
159	Teilzeit, die Summe aller Teilzeiten muss am Tage 16 h und in der Nacht 1 h	$T$	h
160	Verkehrsstärke, maßgebende stündliche	$M$	Kfz/h
161	Volumen	$V$	m <sup>3</sup>
162	Volumen des Maschinenraumes	$V$	m <sup>3</sup>
163	Weglänge, durch den Bewuchs verlaufende	$d_f$	m
164	Weglänge, durch die Bebauung verlaufende	$d_b$	m
165	Weglänge, durch die Installationen eines Industriegebietes verlaufende	$d_s$	m
166	Weglängenunterschied des gebeugten und des direkten Schalls bei Doppelbeugung	$Z$	m
167	Weglängenunterschied des gebeugten und des direkten Schalls bei Einfachbeugung		m

168	Wellenlänge des Schalls bei der betrachteten Oktavband-Mittenfrequenz	$\lambda$	m
169	Zeit	$t$	s, h
170	Züge einer Zugklasse, mittlere Anzahl der	$n$	1/h
171	Zuggeschwindigkeit	$v$	km/h
172	Zuglänge	$l$	m
173	Zuschlag für erhöhte Störwirkung von lichtzeichen-geregelten Kreuzungen und Einmündungen	$K$	dB(A)
174	Zuschlag für Impulshaltigkeit	$K_I$	dB(A)
175	Zuschlag für Ton- und/oder Informationshaltigkeit von Geräuschspitzen	$K_T$	dB(A)

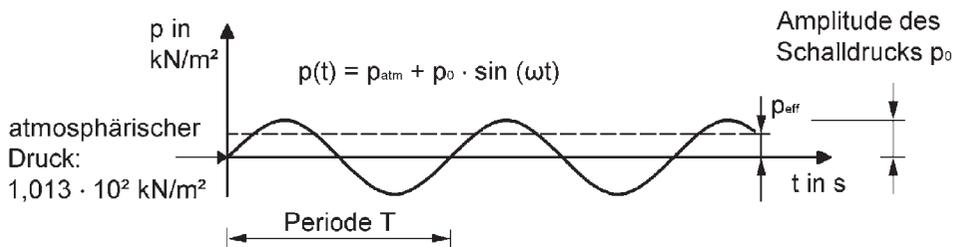
## 7.2 Physikalische Grundlagen der Schallausbreitung

### 7.2.1 Schallschwingung

Allgemein versteht man unter dem Begriff des Schalls die mechanische Schwingung eines elastischen Mediums, das sich in einem beliebigen Aggregatzustand (fest, flüssig, gasförmig) befinden kann. Eine mechanische Schwingung wiederum ist definiert als eine zeitlich periodische Zustandsänderung, die auftritt, wenn bei der Störung des mechanischen Gleichgewichtes Kräfte wirksam werden, die dieses Gleichgewicht wiederherzustellen versuchen. Die Geschwindigkeit, mit der sich die Teilchen des elastischen Mediums um ihren Ruhepunkt bewegen, wird als Schallschnelle  $v$  [m/s] bezeichnet. Die Geschwindigkeit, mit der sich diese Teilchenschwingungen im Medium ausbreiten (durch elastische Kopplung der einzelnen Teilchen werden diese in Form einer Kettenreaktion mit einer entsprechenden zeitlichen Verzögerung ebenfalls in Schwingungen versetzt), wird als Schallgeschwindigkeit  $c$  [m/s] bezeichnet.

Die Bauphysik beschäftigt sich schwerpunktmäßig mit der Schallübertragung in dem den Menschen umgebenden Medium „Luft“ in einem für das menschliche Ohr wahrnehmbaren Bereich. Diese Schallvorgänge implizieren jedoch auch Schwingungen in Festkörpern (Körperschall), die ihrerseits wiederum die Luft zu Schwingungen anregen.

Bild 7.2.1-1 zeigt in einer Prinzipskizze den zeitlichen Verlauf einer harmonischen Schwingung im Medium Luft mit Kennzeichnung der zentralen Begriffe. Diese Schwingungen lassen sich darstellen als sinusförmiger Schallwechseldruck  $p_0 \cdot \sin(\omega t)$ , der dem atmosphärischen Druck  $p_{atm} = 1013 \text{ hPa}$  überlagert wird.



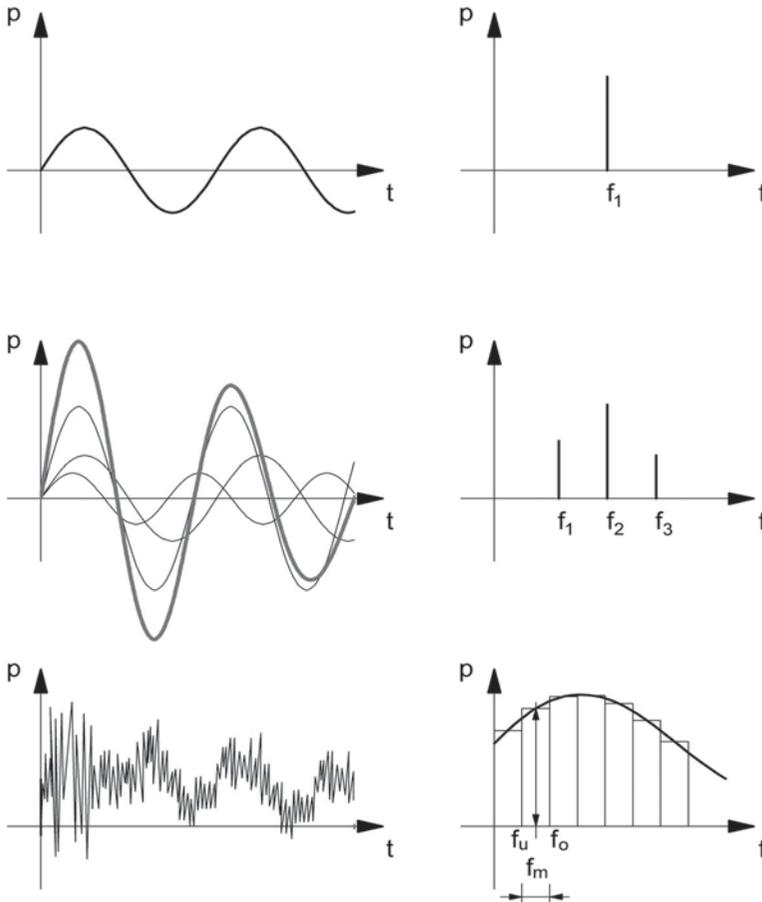
**Bild 7.2.1-1** Darstellung der zeitabhängigen Überlagerung von atmosphärischem Druck  $p_{atm}$  und Schalldruck  $p(t)$  mit Angabe der Periodendauer  $T$ , der Schalldruckamplitude  $p_0$  und dem effektiven Schalldruck  $p_{eff}$

Die Frequenz  $f$  eines Tones wird definiert als Anzahl der Schwingungen pro Sekunde, mithin also als Kehrwert ihrer Periode  $T$ , und wird in Hertz [Hz] = 1/s angegeben. Der effektive Schalldruck  $p_{eff}$  ist definiert als der quadratische Mittelwert des Schallwechseldruckes mit der Einheit Dezibel [dB] und berechnet sich nach Gl. 7.2.1-1.

$$p_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T [p_0 \cdot \sin(\omega \cdot t)]^2 dt} \quad \text{mit} \quad \omega = 2 \cdot \pi \cdot f \quad (7.2.1-1)$$

Ein reiner Ton wird durch eine einzige Frequenz beschrieben, vgl. Bild 7.2.1-2 oben. In

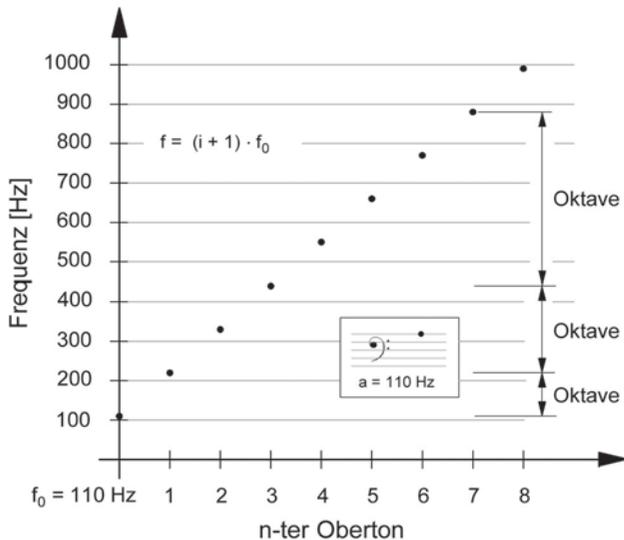
der Natur kommt ein reiner Ton jedoch kaum vor. Ein Klang entsteht aus der Überlagerung unterschiedlicher Frequenzen (bzw. Töne). Durch eine Fourier-Analyse lässt sich ein Klang in eben diese zerlegen (Bild 7.2.1-2 mittig). Ein Geräusch wiederum besteht aus einer beliebigen Überlagerung einer Vielzahl von Tönen und weist in der Regel ein kontinuierliches Frequenzspektrum auf. Zur Frequenzanalyse wird das Frequenzspektrum in Oktaven oder häufiger noch in Terzen zerlegt, die durch ihre jeweiligen Mittenfrequenzen  $f_m$  sowie durch untere und obere Eckfrequenzen  $f_u$  und  $f_o$  beschrieben werden (Bild 7.2.1-2 unten).



**Bild 7.2.1-2** Darstellung des Schalldruckes  $p$  als Funktion der Zeit  $t$  (jeweils links) und der entsprechenden Frequenzanalyse (jeweils rechts) für einen reinen Ton (oben, Frequenz  $f_1$ ), einen Klang (mittig, Frequenzen  $f_1$ ,  $f_2$  und  $f_3$ ) sowie ein Geräusch (unten, Frequenzband, aufgeteilt in Frequenzbereiche mit den Eckfrequenzen  $f_o$  und  $f_u$  sowie der entsprechenden Mittenfrequenz  $f_m$ )

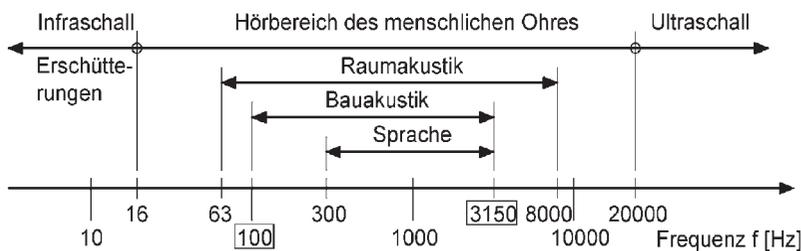
Ein harmonischer Klang setzt sich zusammen aus einem Grundton mit der Frequenz  $f_0$  sowie einer harmonischen Obertonreihe mit den Frequenzen  $f_i$ . Bild 7.2.1-3 zeigt den Aufbau eines harmonischen Klanges. Hier wird jeder Oberton durch das  $n$ -fache der

Frequenz des Grundtons beschrieben, so dass sich ein linearer Frequenzverlauf ergibt. In Anbetracht der Tatsache, dass eine Oktave immer einer Verdopplung der Frequenz entspricht, werden die Intervalle zwischen den einzelnen Obertönen immer enger (an dieser Stelle sei auf die weiterführende Fachliteratur für Musiktheorie verwiesen).



**Bild 7.2.1-3** Aufbau eines harmonischen Klanges am Beispiel des Grundtones  $a$  mit der Frequenz  $f_0 = 110 \text{ Hz}$

Das Frequenzspektrum wird üblicherweise in unterschiedliche Bereiche entsprechend der Darstellung in Bild 7.2.1-4 eingeteilt. Für die Bauakustik (= baulicher Schallschutz) wird der sogenannte „bauakustisch relevante Bereich“ als Frequenzintervall von 100 bis 3150 Hz definiert, für die Raumakustik liegt das Frequenzintervall im Bereich von 63 bis 8000 Hz.



**Bild 7.2.1-4** Darstellung und Benennung unterschiedlicher Bereiche des Frequenzbandes

Tabelle 7.2.1-1 stellt die Oktav- und Terzmittenfrequenzen mit ihren jeweiligen oberen und unteren Eckfrequenzen zusammen und gibt - Luftschall vorausgesetzt - beispielhaft für die Terzmittenfrequenzen die Wellenlängen an.

**Tabelle 7.2.1-1** Zusammenstellung von Oktav- und Terzmittenfrequenzen mit ihren jeweiligen oberen und unteren Eckfrequenzen sowie Wellenlängen für die Terzmittenfrequenzen (Luftschall vorausgesetzt)

	1	2	3	4	5	6	7
1	Oktavband			Terzband			
2	$f_m$ [Hz]	$f_U$ [Hz]	$f_o$ [Hz]	$f_m$ [Hz]	$f_U$ [Hz]	$f_o$ [Hz]	Wellenlänge von $f_m$ [20]
3	31,5	22,5	45	31,5	28	35,5	10,7
4				40	35,5	45	8,5
5				50	45	56	6,8
6	63	45	90	63	56	71	5,4
7				80	71	90	4,3
8				100	90	112	3,4
9	125	90	180	125	112	140	2,7
10				160	140	180	2,1
11				200	180	224	1,7
12	250	180	355	250	224	280	1,4
13				315	280	355	1,1
14				400	355	450	0,85
15	500	355	710	500	450	560	0,68
16				630	560	710	0,61
17				800	710	890	0,42
18	1000	710	1400	1000	890	1120	0,34
19				1250	1120	1410	0,27
20				1600	1410	1800	0,21
21	2000	1400	288	2000	1800	2240	0,17
22				2500	2240	2800	0,14
23				3150	2800	3550	0,11
24	4000	288	5600	4000	3550	4500	0,085
25				5000	4500	5600	0,068
26				6300	5600	7100	0,061
27	8000	5600	11200	8000	7100	9000	0,042
28				10000	9000	11200	0,034

Die Wellenlänge einer mechanischen Schwingung in einem elastischen Medium hängt ab von dessen Schallgeschwindigkeit (vgl. Abschnitt 7.2.2) und der Frequenz der Schwingung (Gl. 7.2.1-2).

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (7.2.1-2)$$

## 7.2.2 Schallgeschwindigkeiten

Die Schallgeschwindigkeit ist diejenige Geschwindigkeit, mit der sich mechanische Schwingungen in einem elastischen Medium fortpflanzen; sie ist in den unterschiedlichen Medien von verschiedenen Parametern abhängig. Eine exemplarische Zusammenstellung unterschiedlicher Schallgeschwindigkeiten ist in Tabelle 7.2.2-1 zu finden.

**Tabelle 7.2.2-1** Exemplarische Zusammenstellung der Schallgeschwindigkeiten und der Schallwellenwiderstände  $Z$  (vgl. Abschnitt 7.2.3) in unterschiedlichen elastischen Medien

	1	2	3
1	Medium	Schallgeschwindigkeit $c$ [m/s]	Schallwellenwiderstand $Z$ [kg/(m <sup>2</sup> ·s)]
2	Luft	344	414
3	Kork	500	12.000
4	Wasser	1480	14.800.000
5	Polystyrol	1800	27.000 bis 54.000
6	Beton	3100	8.000.000
7	Kiefernholz	3600	2.460.000
8	Ziegel	3600	2.520.000 bis 7.200.000
9	Granit	3950	11.060.000
10	Eichenholz	4100	3.280.000
11	Stahl	5050	39.000.000
12	Aluminium	5200	14.000.000
13	Quarzglas	5400	13.500.000

## 7.2.3 Definition unterschiedlicher Schallpegel

### Allgemeines

Ein Pegel ist definiert als der Logarithmus eines Quotienten aus Größen gleicher Einheit. Dabei sind Energiegrößen diejenigen Größen, deren Energie proportional sind (z.B. Schallintensität, Schall-Leistung) und Feldgrößen diejenigen Größen, deren Quadrate der Energie proportional sind (z.B. Schalldruck, Schallschnelle). Die Ermittlung der entsprechenden Pegel erfolgt entsprechend nach Gl. 7.2.3-1 (Energiepegel  $L$  mit

Energiegröße  $y$  und Bezugswert  $y_0$ ) und Gl. 7.2.3-2 (Feldpegel  $L$  mit Feldgröße  $y$  und Bezugswert  $y_0$ ). Beispiele für diese allgemein formulierten Gleichungen werden nachfolgend angeführt.

$$L = 10 \cdot \log \frac{y}{y_0} \quad (7.2.3-1)$$

$$L = 10 \cdot \log \frac{y^2}{y_0^2} = 20 \cdot \log \frac{y}{y_0} \quad (7.2.3-2)$$

### Schallschnelle-Pegel

Unter der Schallschnelle  $v$  versteht man diejenige Geschwindigkeit, mit der die Teilchen eines elastischen Mediums um ihre Ruhelage schwingen (nicht zu verwechseln mit der Schallgeschwindigkeit  $c$ , mit der sich Schallwellen in einem Medium ausbreiten). Der Schallschnellepegel  $L_v$  berechnet sich aus der Schallschnelle  $v$  und dem Bezugswert  $v_0 = 5 \cdot 10^{-8}$  m/s entsprechend Gl. 7.2.3-3.

$$L_v = 20 \cdot \log \frac{v}{v_0} \quad (7.2.3-3)$$

## 7

### Schallwellenwiderstand

Der Schallwellenwiderstand  $Z$  (auch als Schallwellen-Kennwiderstand oder Schall-Kennimpedanz bezeichnet) beschreibt den akustischen Widerstand gegenüber der Ausbreitung von Schallwellen in einem elastischen Medium und errechnet sich aus Rohdichte  $\rho$  und Schallgeschwindigkeit  $c$  nach Gl. 7.2.3-4. In der oben angeführten Tabelle 7.2.2-1 sind einige Beispiele zusammengefasst.

$$Z = \rho \cdot c \quad (7.2.3-4)$$

### Schallintensität und Schallintensitätspegel

Unter der Schallintensität  $I$  versteht man diejenige Schallenergie, die in 1 Sekunde senkrecht durch eine Fläche von  $1 \text{ m}^2$  übertragen wird; sie lässt sich für homogene elastische Medien nach Gleichung 7.2.3-5 ermitteln. Der Schallintensitätspegel  $L_I$  berechnet sich mit dem Bezugswert für die Schallintensität  $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$  nach Gl. 7.2.3-6.

$$I = p_{\text{eff}} \cdot v = \frac{p_{\text{eff}}^2}{Z} \quad (7.2.3-5)$$

$$L_I = 10 \cdot \log \frac{I}{I_0} \quad (7.2.3-6)$$

## Schall-Leistung und Schall-Leistungspegel

Unter der Schall-Leistung  $W$  versteht man die von einer Schallquelle als Luftschall abgegebene akustische Leistung, ermittelt aus der Schallintensität  $I$  und der Hüllfläche  $S$ ; sie lässt sich nach Gl. 7.2.3-7 ermitteln. Der Schall-Leistungspegel  $L_W$  berechnet sich nach Gl. 7.2.3-8. Für einige Schallquellen sind in Tabelle 7.2.3-1 exemplarisch Schall-Leistungen  $W$  und Schall-Leistungspegel  $L_W$  zusammengestellt.

$$W = \oint_S I \cdot dS = I \cdot S \quad (7.2.3-7)$$

$$L_W = 10 \cdot \log \frac{W}{W_0} \quad (7.2.3-8)$$

**Tabelle 7.2.3-1** Exemplarische Zusammenstellung der Schall-Leistungen  $W$  und Schall-Leistungspegel  $L_W$  einiger unterschiedlicher Schallquellen nach [101]

	1	2	3
1	Schallquelle	Schall-Leistung $W$ [W]	Schall-Leistungspegel $L_W$ [dB]
2	Kühlschrank	$10^{-7}$	50
3	Unterhaltungssprache, Schreibmaschine	$10^{-5}$	70
4	laute Sprache, lebhafte Schulklasse	$10^{-3}$	90
5	Flügel	$10^{-1}$	110
6	Presslufthammer	1	120
7	Orgel	10	130
8	Großdiesel	$10^2$	140
9	Sirene	$10^3$	150
10	Strahltriebwerk	$10^4$	160
11	Raketentriebwerk	$10^6$	180

## Schalldruckpegel

Als Schalldruck  $p$  wird die Amplitude einer Schallschwingung bezeichnet. Die Größe der Amplitude beginnt bei der Hörschwelle mit  $20\mu\text{Pa}$ , die Schmerzgrenze ist bei 20 Pa erreicht. Eine Obergrenze ist nicht vorgegeben, sie hängt allein von der eingesetzten schallerzeugenden Energie ab. Zum Vergleich: der atmosphärische Druck, dem der Schalldruck überlagert wird beträgt rund 0,1 MPa. Der Schalldruckpegel  $L_p$  errechnet sich mit dem Bezugswert des Schalldrucks  $p_0$  nach Gl. 7.2.3-9.

$$L_p = 10 \cdot \log \frac{p^2}{p_0^2} = 20 \cdot \log \frac{p}{p_0} \quad (7.2.3-9)$$

Der Minimalwert des Schalldruckpegels liegt damit bei der Hörschwelle mit 0 dB, die Schmerzgrenze bei 120 dB. Tabelle 7.2.3-2 gibt zur Veranschaulichung dieses logarithmischen Wertes einige Beispiele.

**Tabelle 7.2.3-2** Beispiele für Schalldruckpegel

	1	2
1	Geräusch	Schalldruckpegel $L_p$ [dB]
2	Hörschwelle	0
3	Leises Blätterrauschen	15 bis 20
4	Ruhige Wohnlage	30 bis 40
5	Leise Unterhaltung, ruhiges Büro	40 bis 50
6	Normale Unterhaltung	50 bis 60
7	Starker Straßenverkehr	70 bis 80
8	Rufen, Schreien	80 bis 85
9	Lkw in Vorbeifahrt	80 bis 90
10	Druckerei, Preßlufthammer in 10 Meter Entfernung	90 bis 100
11	Schnellzug in Vorbeifahrt	100 bis 110
12	Kesselschmiede	110 bis 120
13	Propellerflugzeug in 3 Meter Entfernung	120 bis 130

### Addition und Subtraktion von Schallpegeln

Die Addition unterschiedlicher Schalldruckpegel  $L_{p,j}$  erfolgt nach Gl. 7.2.3-10, die Addition n gleicher Schalldruckpegel  $L_{p,i}$  erfolgt nach Gl. 7.2.3-11.

$$L_{p,ges} = 10 \cdot \log \sum_{j=1}^n 10^{0,1 \cdot L_{p,j}} \quad (7.2.3-10)$$

$$L_{p,ges} = L_{p,i} + 10 \cdot \log n \quad (7.2.3-11)$$

Häufig ist aus einem Gesamtschalldruckpegel  $L_{p,ges}$  ein einzelner Schalldruckpegel (z.B. bei der Ermittlung des maximal zulässigen Schallpegels einer Zusatzbelastung  $L_{p,1}$  bei Vorgabe eines Immissionsgrenzwertes  $L_{p,ges}$ ) zu ermitteln. Die damit erforderliche Subtraktion von Schallpegeln erfolgt dann nach Gl. 7.2.3-12.

$$L_{p,l} = 10 \cdot \log \left[ 10^{0,1 \cdot L_{p,ges}} - \sum_{i=2}^n 10^{0,1 \cdot L_{p,i}} \right] \quad (7.2.3-12)$$

In Tabelle 7.2.3-3 sind Angaben zur Bewertung von Schalldruckpegeldifferenzen  $\Delta L_p$  (oder auch Schalldruckpegeländerungen) zusammengestellt.

**Tabelle 7.2.3-3** Bewertung von Schallpegeldifferenzen  $\Delta L_p$

	1	2	3
1	Schalldruckpegel-differenz $\Delta L_p$ [dB]	Faktor der Erhöhung bzw. Reduzierung Schallenergie [-]	subjektive Einschätzung
2	$\pm 1$	1,25 bzw. 0,75	Grenze der akustischen Differenzierungsfähigkeit = Änderung gerade wahrnehmbar
3	$\pm 3$	2,0 bzw. 0,5	deutlich wahrnehmbar
4	$\pm 10$	10,0 bzw. 0,10	doppelte bzw. halbierte Lautstärke

### Mittlung zeitlich veränderlicher Schallpegel

Die nachfolgenden Gleichungen gelten gleichermaßen für die unterschiedlichen, vorstehend beschriebenen Schallpegel; nach DIN 45641 [7] sind zur Kennzeichnung des jeweiligen Pegels entsprechende Indizierungen vorzunehmen (Beispiel:  $p$  für Schalldruck,  $v$  für Schallschnelle). Die Mittlung zeitlich veränderlicher Schallpegel  $L(t)$  zu einem äquivalenten Dauerschallpegel  $L_{eq}$  erfolgt für die Mittelungsdauer  $T$  nach Gl. 7.2.3-13.

$$L_{eq} = 10 \cdot \log \left[ \frac{1}{T} \cdot \int_0^T 10^{0,1 \cdot L(t)} dt \right] \quad (7.2.3-13)$$

Besteht der zeitlich veränderliche Schallpegel  $L(t)$  aus einzelnen abschnittsweise konstanten äquivalenten (Dauer-)Schallpegeln  $L_{eq,i}$  mit den jeweiligen Teildauern  $T_i$  („Stufenverlauf“), so berechnet sich der äquivalente Dauerschallpegel  $L_{eq}$  nach Gl. 7.2.3-14.

$$L_{eq} = 10 \cdot \log \left[ \frac{1}{T} \cdot \sum_{i=1}^n T_i \cdot 10^{0,1 \cdot L_{eq,i}} \right] \quad \text{mit } T = \sum_{i=1}^n T_i \quad (7.2.3-14)$$

Ist jede Teildauer  $T_i$  gleich lang, so vereinfacht sich die Ermittlung des äquivalenten Dauerschallpegels zu einem Mittelungspegel  $L_m$  aus den  $n$  Schallpegelwerten  $L_i$  entsprechend Gl. 7.2.3-15.