

Gerhard Müller · Michael Möser (Hrsg.)

# Taschenbuch der Technischen Akustik

Dritte, erweiterte und überarbeitete Auflage

Mit 559 Abbildungen und 119 Tabellen



Springer

# Inhaltsverzeichnis

1	Grundlagen . . . . .	1	2	Akustische Messtechnik . . . . .	25
	G. MÜLLER und M. MÖSER			M. VÖRLÄNDER	
1.1	Einleitung . . . . .	1	2.1	Einleitung . . . . .	25
1.2	Messgrößen und Pegel . . . . .	1	2.2	Mikrofone und Lautsprecher . . . . .	25
1.3	Systemtheoretische Grundlagen . . . . .	2	2.2.1	Kondensator-Messmikrofone . . . . .	26
1.3.1	Beschreibung durch die Impulsantwort . . . . .	2	2.2.2	Schnellemessung . . . . .	27
1.3.2	Reine Töne (Zeitkonvention) . . . . .	3	2.2.3	Körperschallaufnehmer . . . . .	29
1.3.3	Beschreibung durch die Übertragungsfunktion . . . . .	3	2.2.4	Kalibrierung von Mikrofonen . . . . .	31
1.4	Grundgleichungen der Schallausbreitung in Gasen . . . . .	4	2.2.5	Intensitätssonden . . . . .	33
1.5	Schallenergie und Leistungs-transport in Gasen . . . . .	7	2.2.6	Lautsprecher . . . . .	34
1.6	Schallabstrahlung . . . . .	7	2.3	Schallpegelmessung und -bewertung . . . . .	36
1.6.1	Kompakte Quellen . . . . .	7	2.3.1	Zeitkonstanten . . . . .	36
1.6.2	Abstrahlung von Ebenen . . . . .	8	2.3.2	Frequenzbewertung . . . . .	37
1.6.3	Allgemeines Abstrahlproblem . . . . .	10	2.3.3	Präzisionsklassen . . . . .	38
1.7	Grundgleichung der Schallausbreitung in Festkörpern . . . . .	11	2.3.4	Bandpassfilter . . . . .	38
1.8	Wellentypen in Festkörpern mit Berandungen . . . . .	14	2.4	FFT-Analyse . . . . .	40
1.8.1	Raum- und Oberflächenwellen . . . . .	14	2.4.1	Digitalisierung von Messsignalen . . . . .	40
1.8.2	Rayleigh-Welle . . . . .	14	2.4.2	Diskrete Fourier Transformation (DFT) . . . . .	41
1.8.3	Dicke Platten, horizontal geschichtete Continua . . . . .	15	2.4.3	Fast Fourier Transformation (FFT) . . . . .	41
1.8.4	Dünne Platten und dünne Balken . . . . .	16	2.4.4	Mögliche Messfehler . . . . .	41
1.8.5	Dehn-, Torsions-, Scher- und Seilwellen . . . . .	18	2.4.5	Zoom-FFT . . . . .	42
1.9	Anregung von Körperschall . . . . .	18	2.4.6	Fortgeschrittene Signalanalyse . . . . .	43
1.9.1	Impedanzen unendlich ausgedehnter Systeme . . . . .	19	2.5	Messung von Übertragungsfunktionen und Impulsantworten . . . . .	44
1.9.2	Anregung begrenzter Systeme . . . . .	19	2.5.1	Zwei-Kanal-FFT-Technik . . . . .	45
1.9.3	Wellenimpedanzen . . . . .	22	2.5.2	Time-stretched Pulse . . . . .	46
1.10	Dämpfung . . . . .	22	2.5.3	Korrelationsverfahren . . . . .	46
1.11	Reziprozitätsprinzip . . . . .	22	2.5.4	Maximalfolgen . . . . .	46
	Literatur . . . . .	23	2.5.5	Fehlerquellen der digitalen Messverfahren . . . . .	49
			2.6	Messräume . . . . .	50
			2.6.1	Reflexionsfreier Raum . . . . .	50
			2.6.2	Hallraum . . . . .	52
			2.7	Anwendungsbeispiele . . . . .	53

2.7.1	Absorptionsgrad und Impedanz . . . . .	53	5.2.5	Mittlerer Maximalpegel . . . . .	106
2.7.2	Modalanalyse . . . . .	55	5.2.6	Beurteilungspegel . . . . .	106
2.7.3	Reziproke Messung der Schall- abstrahlung . . . . .	55	5.2.7	Kennzeichnungszeit . . . . .	108
	Literatur . . . . .	57	5.2.8	Immissionswerte . . . . .	108
3	Numerische Methoden . . . . .	59	5.2.9	Ermittlung der Schallbelastung . . . . .	109
	B. A. T. PETERSSON		5.2.10	Qualitätssicherung . . . . .	109
3.1	Einleitung . . . . .	59	5.3	Spezielle Beurteilungsverfahren . . . . .	109
3.2	Diskretisierung von Differential- gleichungen . . . . .	60	5.3.1	Lautstärkepegel, Lautheit . . . . .	110
3.3	Integralgleichungen . . . . .	64	5.3.2	Berechnete Lautheit nach Zwicker . . . . .	110
3.4	Statistisches Verfahren . . . . .	67	5.3.3	Perceived Noise Level nach Kryter . . . . .	111
3.5	Asymptotische Methoden . . . . .	76	5.3.4	Noise-Rating-Kurven . . . . .	112
	Literatur . . . . .	79	5.3.5	Frequenzbewertungskurven . . . . .	112
4	Schallwirkungen beim Menschen C. MASCHKE und U. WIDMANN	81	5.3.6	Sprachverständlichkeit . . . . .	114
4.1	Physiologische Aspekte . . . . .	81	5.3.7	Beurteilung tieffrequenten Schalls im Immissionsschutz . . . . .	118
4.1.1	Ohr . . . . .	81	5.3.8	Beurteilung tonhaltiger Schalle nach DIN 45681 . . . . .	119
4.1.2	Hörbahn . . . . .	82	5.4	Quellenbezogene Beurteilungs- verfahren . . . . .	120
4.2	Wahrnehmung . . . . .	84	5.4.1	Straßenverkehr . . . . .	120
4.2.1	Allgemeingültige psycho- akustische Ansätze . . . . .	84	5.4.2	Schieneverkehr . . . . .	126
4.2.2	Spezifische psychologische Ansätze . . . . .	90	5.4.3	Luftverkehr . . . . .	128
4.2.3	Lokalisation . . . . .	90	5.4.4	Industrie-, Gewerbe- und Freizeit- anlagen . . . . .	131
4.3	Gesundheitliche Beeinträchti- gungen durch Lärm . . . . .	91	5.4.5	Arbeitsplatz . . . . .	135
4.3.1	Aurale Beeinträchtigungen . . . . .	91	5.4.6	Haustechnische Anlagen . . . . .	138
4.3.2	Extraurale Beeinträchtigungen . . . . .	92	5.5	Gebietsbezogene Beurteilung von Schallimmissionen . . . . .	139
4.3.3	Belästigung . . . . .	96	5.5.1	Lärminderungsplanung . . . . .	139
4.3.4	Herz-Kreislauf-Krankheiten . . . . .	97	5.5.2	Gebietsbezogene Beurteilung hinsichtlich der Belästigung . . . . .	144
4.4	Nichtakustische Einflussgrößen (Moderatoren) . . . . .	97		Literatur . . . . .	144
	Literatur . . . . .	99	6	Beurteilung von Geräusch- emissionen . . . . .	149
5	Beurteilung von Schallimmis- sionen – Vorschriften – Normen – Richtlinien . . . . .	103		G. HÜBNER und E. SCHÖRER	
	D. GOTTLÖB und B. VOGEL SANG		6.1	Grundlagen und Normung der Geräuschemissionsmessung . . . . .	149
5.1	Einleitung . . . . .	103	6.1.1	Kennzeichnende physikalische Größen . . . . .	149
5.2	Beurteilungsgrundlagen . . . . .	103	6.1.2	Die Messung der Kenngrößen . . . . .	157
5.2.1	Momentane Schallstärke . . . . .	103	6.2	Messung von Geräusch- emissionen in situ . . . . .	172
5.2.2	Akustische Kenngrößen für einzelne Schallereignisse . . . . .	105	6.2.1	Praktische Aspekte bei der Anwendung vorhandener Messverfahren . . . . .	173
5.2.3	Akustische Kenngrößen für kon- tinuierliche und intermittierende Schallimmissionen . . . . .	105	6.2.2	In-situ-Messung der Geräusch- emission von Einzelschallquellen . . . . .	179
5.2.4	Perzentilpegel . . . . .	106	6.2.3	Messung der Geräuschemission ausgedehnter Schallquellen . . . . .	183
				Literatur . . . . .	188

7	Schallausbreitung im Freien . . . . .	193	8.2.5	Verhalten von schwimmenden Estrichen . . . . .	232
	L. SCHREIBER		8.2.6	Verhalten üblicher Massivdecken mit schwimmenden Estrichen . . . . .	233
7.1	Vorbemerkungen . . . . .	193	8.2.7	Berechnung der Trittschallübertragung . . . . .	234
7.2	Verlustlose Schallausbreitung . . . . .	194	8.3	Schallschutz bei Holzhäusern . . . . .	234
7.2.1	Unbegrenztes Schallfeld . . . . .	194	8.3.1	Allgemeines . . . . .	234
7.2.2	Schallquelle über dem Boden, Reflexion . . . . .	194	8.3.2	Schall-Längsleitung . . . . .	234
7.2.3	Abschirmung durch Hindernisse . . . . .	196	8.3.3	Schalldämmung von Holzbalkendecken . . . . .	236
7.2.4	Diffuse Streuung . . . . .	197	8.3.4	Berechnung . . . . .	239
7.3	Zusatzdämpfung durch Absorption (Dissipation) der Luft . . . . .	197	8.4	Haustechnische Anlagen . . . . .	240
7.4	Einfluss von Bodenbeschaffenheit, Bewuchs und Bebauung auf die Schallausbreitung . . . . .	199	8.4.1	Wasserinstallationen . . . . .	240
7.4.1	Zusatzdämpfung bei Schallausbreitung über Boden und Bewuchs . . . . .	199	8.4.2	Aufzugsanlagen . . . . .	243
7.4.2	Zusatzdämpfung bei Schallausbreitung durch Bewuchs hindurch . . . . .	199	9	Schallabsorber . . . . .	247
7.4.3	Zusatzdämpfung durch Bebauung . . . . .	200		H. V. FUCHS und M. MÖSER	
7.5	Einfluss von Inhomogenitäten der Luft . . . . .	200	9.1	Einleitung . . . . .	247
7.5.1	Windgeschwindigkeitsgradient . . . . .	200	9.2	Schallabsorption für Lärmschutz und Raumakustik . . . . .	247
7.5.2	Temperaturgradient . . . . .	201	9.3	Passive Absorber . . . . .	251
7.5.3	Turbulenz . . . . .	202	9.3.1	Faserige Materialien . . . . .	252
7.6	Schallimmissionsberechnung . . . . .	202	9.3.2	Offenporige Schaumstoffe . . . . .	254
7.6.1	Vorbemerkung . . . . .	202	9.3.3	Geblähte Baustoffe . . . . .	255
7.6.2	Berechnung nach DIN ISO 9613-2 . . . . .	202	9.4	Reaktive Absorber im Schallfeld . . . . .	255
7.6.3	Einschränkungen . . . . .	203	9.5	Plattenresonatoren . . . . .	259
	Literatur . . . . .	204	9.5.1	Folienabsorber . . . . .	260
8	Schallausbreitung in Gebäuden . . . . .	207	9.5.2	Plattenschwinger . . . . .	262
	K. GÖSELE und E. SCHRÖDER		9.5.3	Verbundplatten-Resonatoren . . . . .	264
8.1	Luftschalldämmung . . . . .	207	9.6	Helmholtz-Resonatoren . . . . .	269
8.1.1	Kennzeichnung . . . . .	207	9.6.1	Lochflächenabsorber . . . . .	270
8.1.2	Messung . . . . .	209	9.6.2	Schlitzförmige Absorber . . . . .	271
8.1.3	Verhalten einschaliger Bauteile . . . . .	209	9.6.3	Membranabsorber . . . . .	272
8.1.4	Verhalten doppelschaliger Bauteile . . . . .	212	9.7	Interferenzdämpfer . . . . .	278
8.1.5	Schall-Längsleitung im Massivbau . . . . .	218	9.7.1	$\lambda/4$ -Resonatoren . . . . .	278
8.1.6	Undichtigkeiten . . . . .	223	9.7.2	$\lambda/2$ -Resonatoren . . . . .	280
8.2	Trittschalldämmung . . . . .	226	9.7.3	Rohrschalldämpfer . . . . .	280
8.2.1	Messung und Kennzeichnung von Decken . . . . .	226	9.8	Aktive Resonatoren . . . . .	281
8.2.2	Kennzeichnung von Deckenauflagen . . . . .	228	9.9	Mikroperforierte Absorber . . . . .	284
8.2.3	Verhalten von Decken ohne Auflagen . . . . .	229	9.9.1	Mikroperforierte Platten . . . . .	287
8.2.4	Verhalten von Gehbelägen . . . . .	231	9.9.2	Mikroperforierte Folien . . . . .	290
			9.9.3	Mikroperforierte Flächengebilde . . . . .	292
			9.10	Hochintegrierte Absorber . . . . .	293
			9.10.1	Breitband-Kompaktabsorber . . . . .	295
			9.10.2	Reflexionsarme Raumauskleidungen . . . . .	297
			9.10.3	Schalldämpfende Schornsteininnenzüge . . . . .	298
			9.11	Schlussbemerkungen . . . . .	300
				Literatur . . . . .	302

10	Körperschalldämmung und -dämpfung . . . . .	305	11.3.4	Untersuchungen an physika- lischen Modellen . . . . .	351
	M. HECKL† und J. NUTSCH†		11.3.5	Auralisation . . . . .	352
10.1	Einleitung . . . . .	305	11.4	Grundsätze raumakustischer Planung . . . . .	352
10.2	Isolation bei tiefen Frequenzen (elastische Lagerung) . . . . .	305	11.4.1	Allgemeine Hinweise . . . . .	352
10.2.1	Abstimmfrequenz . . . . .	306	11.4.2	Räume für Sprachdarbietungen . . . . .	353
10.2.2	Ausführung elastischer Lagerungen . . . . .	307	11.4.3	Konzertsäle . . . . .	355
10.2.3	Dämmwirkung einer elastischen Lagerung . . . . .	313	11.4.4	Opernhäuser . . . . .	356
10.3	Körperschalldämmung . . . . .	315	11.4.5	Mehrzwecksäle und Räume mit veränderlicher Nachhallzeit . . . . .	357
10.3.1	Entfernungsabnahme . . . . .	315	11.4.6	Kirchen . . . . .	358
10.3.2	Materialwechsel, Querschnitts- sprünge und Umlenkungen . . . . .	316	11.4.7	Räume mit elektroakustischem Nutzungsschwerpunkt . . . . .	359
10.4	Körperschalldämpfung . . . . .	316	11.4.8	Arbeitsräume und weitere Raum- gruppen . . . . .	359
10.4.1	Verlustfaktor von verschiede- nen Materialien und Konstruk- tionen . . . . .	319	11.5	Raumakustische Messungen . . . . .	360
10.4.2	Kombinationen von Materialien mit großen und kleinen Verlust- faktoren . . . . .	320		Literatur . . . . .	362
10.4.3	Dämpfung an Kontaktflächen . . . . .	323	12	Schalldämpfer . . . . .	367
10.4.4	Kombination von Dämmung und Dämpfung . . . . .	324		U. KURZE und E. RIEDEL	
10.5	Abstrahlung von Körperschall . . . . .	326	12.1	Übersicht . . . . .	367
10.6	Charakterisierung der Emissions- stärke von Körperschallquellen . . . . .	328	12.1.1	Anwendungsbereiche . . . . .	367
	Literatur . . . . .	328	12.1.2	Bauformen . . . . .	368
			12.1.3	Anforderungen und Merkmale . . . . .	369
11	Raumakustik . . . . .	331	12.2	Wirkprinzipien . . . . .	372
	H. KUTTRUFF und E. MOMMERTZ		12.2.1	Pulsationsabbau durch Drossel- schalldämpfer . . . . .	372
11.1	Grundtatsachen der Schallaus- breitung in Räumen . . . . .	331	12.2.2	Absorption in feinporigen oder -faserigen Strukturen . . . . .	373
11.1.1	Vorbemerkung . . . . .	331	12.2.3	Absorption durch Nichtlinearitäten . . . . .	374
11.1.2	Wellentheorie der Raumakustik . . . . .	332	12.2.4	Reflexion . . . . .	374
11.1.3	Geometrische Raumakustik . . . . .	333	12.2.5	Regeneration von Schall . . . . .	375
11.1.4	Nachhall und stationäre Energie- dichte in Räumen mit diffusem Schallfeld . . . . .	336	12.3	Auslegungskenngrößen und -grundsätze . . . . .	376
11.2	Zur subjektiven Wirkung räum- licher Schallfelder . . . . .	338	12.3.1	Primäre Kenngrößen . . . . .	376
11.2.1	Einzelne Rückwürfe . . . . .	339	12.3.2	Weitere betriebliche Anforderungen . . . . .	378
11.2.2	Rückwurffolgen . . . . .	340	12.3.3	Leitlinien für wirtschaftliche Konstruktionen . . . . .	379
11.2.3	Nachhall . . . . .	344	12.4	Erfahrungswerte . . . . .	380
11.3	Entwurfsmethoden der Raumakustik . . . . .	345	12.4.1	Kulissenschalldämpfer . . . . .	380
11.3.1	Zeichnerische Konstruktion von Schallstrahlen . . . . .	345	12.4.2	Kanalauskleidungen . . . . .	382
11.3.2	Berechnung der Nachhallzeit . . . . .	345	12.4.3	Ausblaseschalldämpfer . . . . .	384
11.3.3	Computersimulation der Schall- übertragung . . . . .	347	12.5	Berechnungsverfahren . . . . .	384
			12.5.1	Dämpfung . . . . .	384
			12.5.2	Druckverminderung . . . . .	393
			12.5.3	Strömungsrauschen . . . . .	397
			12.6	Messverfahren . . . . .	398
			12.6.1	Regelwerke . . . . .	398
			12.6.2	Labormessungen . . . . .	398
			12.6.3	Feldmessungen . . . . .	399
				Literatur . . . . .	400

13	Aktive Beeinflussung von Schall und Schwingungen . . . . . 401 J. SCHEUREN	14.6.1	Druckempfänger . . . . . 455
13.1	Einleitung . . . . . 401	14.6.2	Druckgradientenempfänger . . . . . 456
13.2	Anmerkungen zur historisch technischen Entwicklung . . . . . 402	14.6.3	Interferenzempfänger . . . . . 456
13.3	Struktur der allgemeinen Problemstellung . . . . . 403	14.6.4	Wandlerarten . . . . . 457 Literatur . . . . . 458
13.4	Grundsätzliche Betrachtungen zur Wirkungsweise aktiver Systeme . . . . . 406	15	Schallquellen . . . . . 459 U. KURZE
13.4.1	Vorgehensweise bei der Auslegung aktiver Systeme . . . . . 407	15.1	Schallentstehung . . . . . 459
13.4.2	Quellnachbildung . . . . . 408	15.1.1	Breitbandige Geräusche . . . . . 459
13.4.3	Aktive Beeinflussung der Wellenausbreitung . . . . . 410	15.1.2	Schmalbandige Geräusche . . . . . 463
13.4.4	Aktive Beeinflussung abge- schlossener Bereiche . . . . . 418	15.2	Quellterm und innere Impedanz/ Admittanz . . . . . 465
13.4.5	Aktive Kompensation der Schallabstrahlung . . . . . 423	15.2.1	Modell zur linearen Akustik . . . . . 465
13.4.6	Stabilisierung selbstregter Systeme . . . . . 425	15.2.2	Leistungsanpassung . . . . . 466
13.4.7	Energie- und Leistungs- betrachtungen . . . . . 427	15.2.3	Luftschall in Kanälen . . . . . 467
13.5	Aktive Klanggestaltung . . . . . 428	15.2.4	Rollgeräusche . . . . . 467
13.6	Aspekte der Signalverarbeitung . . . . . 430	15.2.5	Zahnräder . . . . . 468
13.7	Elektromechanische Wandler als Stetgliedern . . . . . 433	15.3	Maßnahmen zur Geräusch- minderung . . . . . 469
13.8	Weitere Anwendungen . . . . . 434	15.3.1	Minderung des Quellterms . . . . . 469
13.9	Zusammenfassung und Ausblick Literatur . . . . . 436	15.3.2	Änderung der Impedanz . . . . . 472
14	Beschallungstechnik . . . . . 441 H. FRISCH	15.3.3	Abkopplung, Verstimmung und Bedämpfung von Resonatoren . . . . . 472 Literatur . . . . . 473
14.1	Einleitung . . . . . 441	16	Straßenverkehrslärm . . . . . 475 L. SCHREIBER
14.2	Verstärkungsanlagen für Sprache und Musik . . . . . 441	16.1	Bedeutung des Straßenverkehrs als Lärmquelle . . . . . 475
14.2.1	Verstärkungsanlagen in Räumen . . . . . 442	16.2	Das einzelne Fahrzeug als Schallquelle . . . . . 476
14.2.2	Verstärkungsanlagen im Freien . . . . . 444	16.2.1	Antriebsgeräusche . . . . . 476
14.3	Anlagen zur Simulation raum- akustischer Gegebenheiten . . . . . 446	16.2.2	Rollgeräusch . . . . . 476
14.3.1	Nachhallzeitverlängerung . . . . . 446	16.2.3	Windgeräusche . . . . . 476
14.3.2	Raumakustikmanipulation . . . . . 446	16.2.4	Grenzwerte für die Schall- emission von Kraftfahrzeugen . . . . . 477
14.4	Lautsprecher . . . . . 447	16.3	Straßenverkehr als Schallquelle . . . . . 478
14.4.1	Elektromechanische Wandler- arten . . . . . 447	16.3.1	Maße und Grenzwerte für die Stärke der Schallimmission durch Straßenverkehr . . . . . 478
14.4.2	Richtcharakteristik eines Konustreibers . . . . . 448	16.3.2	Berechnung des Beurteilungs- pegels von Straßenverkehrs- geräuschen . . . . . 478
14.4.3	Tiefenlautsprecher . . . . . 448	16.4	Messung von Straßenverkehrs- geräuschen . . . . . 480
14.4.4	Mittel-Hochton-Lautsprecher . . . . . 448	16.5	Vorschriften zum Schutz gegen Straßenverkehrslärm . . . . . 480
14.5	Kopplung von Lautsprechern . . . . . 450	16.6	Maßnahmen zum Schutz gegen Verkehrslärm . . . . . 481 Literatur . . . . . 482
14.5.1	Spezielle Arrays . . . . . 452		
14.6	Mikrofone . . . . . 455		

17	Geräusche und Erschütterungen aus dem Schienenverkehr . . . . .	483	17.5.4	Körperschall und Erschütterungen Literatur . . . . .	574 575
	R. G. WETTSCHURECK, G. HAUCK, R. J. DIEHL und L. WILLENBRINK		18	Fluglärm . . . . .	585
17.1	Einleitung . . . . .	483		J. DELFS, W. DOBRZYNSKI, H. HELLER, U. ISERMANN, U. MICHEL, W. SPLETISTÖSSER und F. OBERMEIER	
17.2	Luftschall bei Eisenbahnen . . . . .	484	18.1	Schallemission . . . . .	585
17.2.1	Begriffsbestimmungen . . . . .	484	18.1.1	Flugzeuge mit Strahltrieb- werken . . . . .	585
17.2.2	Schallemissionen . . . . .	494	18.1.2	Propellerantriebe . . . . .	595
17.2.3	Schallimmissionen . . . . .	512	18.1.3	Hubschrauber . . . . .	602
17.2.4	Wirkung und Bewertung von Schienenverkehrsgeräuschen . . . . .	523	18.1.4	Umströmungsgeräusch von Flächenflugzeugen . . . . .	611
17.2.5	Gesetzliche Regelungen . . . . .	526	18.2	Schallimmission . . . . .	617
17.2.6	Geräuschmessungen an Schienenfahrzeugen . . . . .	527	18.2.1	Einzelgeräusche . . . . .	617
17.3	Körperschall, Erschütterungen bei Eisenbahnen . . . . .	528	18.2.2	Abhängigkeit der Kenngrößen des Einzelgeräusches vom Vorbei- flugabstand und von der Flug- geschwindigkeit . . . . .	618
17.3.1	Allgemeines, Begriffsbestim- mungen . . . . .	528	18.2.3	Fluglärmrechnungsverfahren . . . . .	618
17.3.2	Körperschallentstehung . . . . .	530	18.3	Fluglärmbewertung . . . . .	621
17.3.3	Körperschallausbreitung im Boden . . . . .	537	18.4	Überschallknall . . . . .	622
17.3.4	Körperschalleinleitung in Ge- bäude und Körperschallausbrei- tung im Inneren von Gebäuden . . . . .	538	18.4.1	Definition und Beschreibung . . . . .	622
17.3.5	Sekundärer Luftschall in Gebäuden . . . . .	539	18.4.2	Erläuterungen der den Überschall- knall beschreibenden Größen . . . . .	624
17.3.6	Beurteilung von Körperschall, Erschütterungen und sekun- därem Luftschall . . . . .	542	18.4.3	Knallteppich . . . . .	624
17.3.7	Schutzmaßnahmen im Bereich der Körperschallentstehung . . . . .	544	18.4.4	Wirkung des Überschallknalls auf den Menschen . . . . .	627
17.3.8	Schutzmaßnahmen im Bereich der Körperschallausbreitung im Boden . . . . .	555	18.4.5	Wirkung des Überschallknalls auf Tiere . . . . .	628
17.3.9	Schutzmaßnahmen an Gebäuden . . . . .	556	18.4.6	Wirkung des Überschallknalls auf Bauwerke und auf den Erdboden . . . . .	628
17.3.10	Prognose von Körperschall- und Erschütterungsimmissionen . . . . .	557	18.4.7	Bibliographien . . . . .	629
17.4	Luftschall und Körperschall, Erschütterungen bei Nahverkehrs- bahnen . . . . .	559		Literatur . . . . .	629
17.4.1	Allgemeines . . . . .	559	19	Baulärm . . . . .	639
17.4.2	Besonderheiten bei Nahverkehrs- bahnen gegenüber Eisenbahnen . . . . .	560		A. BÖHM, O. T. STRACHOTTA und V. IRMER	
17.4.3	Spezielle Körperschallminderungs- maßnahmen für den innerstädti- schen Bereich von Straßenbahnen . . . . .	561	19.1	Einleitung . . . . .	639
17.5	Simulationsmodelle zur Prognose von Luftschall und Körperschall/ Erschütterungen von Bahnen . . . . .	565	19.2	Geräuschimmissionen . . . . .	640
17.5.1	Überblick . . . . .	565	19.2.1	Geräuschimmissionen am Arbeitsplatz . . . . .	640
17.5.2	Rollgeräusche . . . . .	565	19.2.2	Geräuschimmissionen in der Umgebung von Baustellen . . . . .	640
17.5.3	Innengeräusche und Aggregat- geräusche . . . . .	572	19.3	Geräuschimmissionen von im Freien betriebenen Geräten, Maschinen und Baustellen . . . . .	644
			19.3.1	EU-Richtlinie zur Begrenzung der Geräuschimmissionen . . . . .	644

19.3.2	Inhalt der EU-Richtlinie zur Begrenzung der Geräuschemissionen . . . . .	645	21	Strömungsgeräusche . . . . .	683
19.3.3	Auswirkungen auf die Hersteller und Verbraucher . . . . .	650		B. STÜBER, K. R. FRITZ, C.-C. HANTSCHK, S. HEIM, H. NÜRNBERGER, E. SCHIÖRER und D. VÖRTMEYER	
19.3.4	Derzeitige und zukünftige Benutzervorteile für lärmarme Geräte und Maschinen . . . . .	650	21.1	Schallentstehung durch Strömungen . . . . .	683
19.3.5	Schalleistungspegel von Geräten und Baumaschinen – relative Spektren . . . . .	654	21.1.1	Quellterme . . . . .	683
19.4	Geräuschbegrenzung und Schallschutzmaßnahmen . . . . .	654	21.1.2	Kavitation . . . . .	685
19.4.1	Beschwerden über unzureichende Geräuschbegrenzung und Schallschutzmaßnahmen . . . . .	654	21.1.3	Angeströmte Kreiszyylinder . . . . .	692
19.4.2	Schalltechnische Planung, Einrichtung und Räumung von Baustellen . . . . .	654	21.1.4	Turbulenter Freistrahle . . . . .	696
19.4.3	Geräuschminderung an im Freien betriebenen Maschinen, Geräten und Baustellen . . . . .	655	21.1.5	Turbulente Grenzschicht . . . . .	699
	Literatur . . . . .	657	21.2	Rohrleitungen (Kanäle) . . . . .	700
20	Städtebaulicher Schallschutz . . . . .	661	21.2.1	Schallabstrahlung in die Rohrleitung . . . . .	700
	M. JÄCKER-CÜPPERS		21.2.2	Innerer Schalleistungspegel und Schalldruckpegel . . . . .	701
20.1	Einleitung . . . . .	661	21.2.3	Schalleistung gasgefüllter Rohrleitungen . . . . .	701
20.2	Beeinträchtigungen durch Lärm im Wohnumfeld . . . . .	661	21.2.4	Schalleistung flüssigkeitsgefüllter Rohre . . . . .	701
20.3	Grundsätze des städtebaulichen Lärmschutzes . . . . .	663	21.2.5	Schallpegelabnahme in gasgefüllten Rohrleitungen . . . . .	702
20.3.1	Lärmwirkungen und Ziele des städtebaulichen Lärmschutzes . . . . .	663	21.2.6	Schallpegelabnahme auf Rohrleitungen bei Körperschallanregung . . . . .	703
20.3.2	Prinzipielle Konfliktfälle im städtebaulichen Lärmschutz . . . . .	664	21.2.7	Schalldämmung gasgefüllter Rohrleitungen . . . . .	703
20.3.3	Methodik des städtebaulichen Lärmschutzes . . . . .	665	21.2.8	Abstrahlgrade . . . . .	705
20.3.4	Prinzipien, Instrumente, Maßnahmen und Akteure der Lärmbekämpfung . . . . .	668	21.2.9	Schalldämmende Ummantelungen kreisförmiger Rohre . . . . .	706
20.4	Rechtsgrundlagen des städtebaulichen Lärmschutzes . . . . .	669	21.3	Ventilatoren (Gebläse) . . . . .	706
20.5	Maßnahmen . . . . .	673	21.3.1	Kennzeichnung . . . . .	706
20.5.1	Verkehrsvermeidung . . . . .	673	21.3.2	Schallentstehung . . . . .	707
20.5.2	Maßnahmen zur Verlagerung auf emissionsarme Quellen . . . . .	675	21.3.3	Näherungsweise Berechnung der Schallabstrahlung . . . . .	709
20.5.3	Vermindern der Emissionen . . . . .	676	21.3.4	Geräuschminderung . . . . .	713
20.5.4	Maßnahmen auf dem Ausbreitungsweg . . . . .	678	21.4	Verdichter . . . . .	715
20.5.5	Maßnahmen am Immissionsort . . . . .	679	21.4.1	Schallentstehung . . . . .	715
	Literatur . . . . .	680	21.4.2	Näherungsweise Berechnung der Schallabstrahlung . . . . .	716
			21.4.3	Geräuschminderung . . . . .	716
			21.5	Pumpen . . . . .	716
			21.5.1	Schallentstehung . . . . .	717
			21.5.2	Näherungsweise Berechnung der Schallabstrahlung . . . . .	720
			21.5.3	Geräuschminderung . . . . .	721
			21.6	Elektromotoren . . . . .	723
			21.7	Windenergieanlagen (WEA) . . . . .	724
			21.7.1	Bauformen und Betrieb . . . . .	724
			21.7.2	Schallentstehung . . . . .	724
			21.7.3	Näherungsweise Berechnung der Schallabstrahlung . . . . .	725



21.7.4	Geräuschminderung . . . . .	725	22.6.2	Ultraschallreinigung . . . . .	761
21.7.5	Messung und Beurteilung der Geräusche . . . . .	726	22.6.3	Verbindungstechnik . . . . .	762
21.8	Verwirbelte Ausströmung und Umströmung . . . . .	726	22.6.4	Bohren und Schneiden . . . . .	763
21.8.1	Schallentstehung . . . . .	726	22.6.5	Vernebelung von Flüssigkeiten . . . . .	764
21.8.2	Näherungsweise Berechnung der Schallabstrahlung . . . . .	727	22.6.6	Medizinische Therapie . . . . .	765
21.8.3	Geräuschminderung . . . . .	728		Literatur . . . . .	765
21.9	Armaturen (Ventile) . . . . .	728	23	Erschütterungen . . . . .	767
21.9.1	Schallentstehung . . . . .	728		J. GUGGENBERGER und G. MÜLLER	
21.9.2	Näherungsweise Berechnung der Schallabstrahlung . . . . .	730	23.1	Allgemeines, Begriffsbestim- mung . . . . .	767
21.9.3	Geräuschminderung . . . . .	732	23.2	Anhaltswerte und Grenzwerte zur Beurteilung von Erschütterungen	767
21.10	Wassgeräusche in Kühltürmen	732	23.2.1	Einwirkung von Erschütterungen auf den Menschen . . . . .	767
21.11	Pneumatische Feststoff- Transportleitungen . . . . .	733	23.2.2	Einwirkung von Erschütterungen auf Gebäude . . . . .	772
21.11.1	Niederdruck-Förderanlagen . . . . .	733	23.2.3	Einwirkung von Erschütterungen auf empfindliche Anlagen und Vorgänge . . . . .	773
21.11.2	Hochdruck-Förderanlagen . . . . .	734	23.3	Erschütterungsquellen und Isoliermaßnahmen . . . . .	775
21.12	Industrielle Brenner . . . . .	736	23.3.1	Allgemeines . . . . .	775
21.12.1	Näherungsweise Berechnung der Schallabstrahlung . . . . .	736	23.3.2	Maschinen . . . . .	775
21.12.2	Geräuschminderung . . . . .	737	23.3.3	Erschütterungen bei Bauarbeiten	780
21.13	Selbsterregte Schwingungen in Feuerungen . . . . .	738	23.3.4	Sprengungen . . . . .	782
21.13.1	Entstehungsmechanismus . . . . .	738	23.3.5	Straßenverkehr . . . . .	783
21.13.2	Berechnung . . . . .	739	23.3.6	Menscheninduzierte Schwin- gungen . . . . .	784
21.13.3	Gegenmaßnahmen . . . . .	740	23.4	Übertragung von Erschütterungen und Erschütterungsschutz . . . . .	788
	Literatur . . . . .	742	23.4.1	Anregung und Übertragung von Erschütterungen im Erdreich	788
22	Ultraschall . . . . .	751	23.4.2	Einleitung von Erschütterungen in Gebäude . . . . .	790
	H. KUTTRUFF		23.4.3	Übertragung von Erschütterungen innerhalb von Gebäuden . . . . .	792
22.1	Einleitung . . . . .	751	23.4.4	Erschütterungsreduzierende Maß- nahmen an Gebäuden . . . . .	792
22.2	Ausbreitung und Abstrahlung . . . . .	751	23.4.5	Isoliermaßnahmen an empfind- lichen Geräten . . . . .	796
22.2.1	Dämpfung . . . . .	751		Literatur . . . . .	798
22.2.2	Reflexion und Brechung . . . . .	752			
22.2.3	Abgestrahltes Schallfeld . . . . .	753			
22.3	Erzeugung von Ultraschall . . . . .	754			
22.4	Nachweis und Empfang . . . . .	756			
22.5	Kleinsignalanwendungen . . . . .	757			
22.5.1	Impulsechoverfahren . . . . .	757			
22.5.2	Zerstörungsfreie Materialprüfung	758			
22.5.3	Medizinische Diagnostik . . . . .	759			
22.5.4	Weitere Anwendungen . . . . .	760			
22.6	Wirkungen und Anwendungen von Leistungultraschall . . . . .	761			
22.6.1	Kavitation . . . . .	761			
				Sachverzeichnis . . . . .	803