

Taschenbuch  
der

# Technischen Akustik

Zweite Auflage  
mit 495 Abbildungen

Herausgegeben von  
M. Heckl · H. A. Müller

Springer-Verlag

Berlin Heidelberg New York

London Paris Tokyo

Hong Kong Barcelona Budapest

# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Physikalische Grundlagen</b>	<b>von M. Heckl</b>	<b>1</b>
1.1	Einleitung	1
1.2	Meßgrößen	1
1.2.1	Schall in Gasen und Flüssigkeiten (s. Tabelle 1.3)	1
1.2.1.1	Zeit- und Frequenzverlauf des Schalldrucks	1
1.2.1.2	Zeit- und Frequenzverlauf der Schallschnelle	3
1.2.1.3	Intensität, Leistung, Impedanz	3
1.2.1.4	Schallausbreitungsgeschwindigkeit, Wellenlänge	5
1.2.2	Schall in Festkörpern (Körperschall)	8
1.2.2.1	Die verschiedenen Wellentypen	8
1.2.2.2	Schallermüdung	10
1.3	Grundgleichungen	11
1.3.1	Luftschall und Flüssigkeitsschall	11
1.3.2	Körperschall	13
1.4	Abstrahlung	14
1.4.1	Luftschall und Flüssigkeitsschall	14
1.4.2	Körperschall	17
1.5	Schallausbreitung	18
1.5.1	Brechung	18
1.5.2	Streuung	18
1.6	Reflexion von Schallwellen (Spiegelung)	20
1.7	Dämpfung	21
1.8	Schall in begrenzten Räumen (stehende Wellen)	21
1.9	Literatur	24
<b>2. Akustische Meßtechnik</b>	<b>von M. Möser</b>	<b>26</b>
2.1	Einleitung	26
2.2	Meßgrößen	26
2.3	Meßgeräte	27
2.3.1	Allgemeine Anforderungen	27
2.3.2	Mikrophone	27
2.3.3	Körperschallaufnehmer	31
2.4	Zeitverlauf und Spektrum	33
2.4.1	Charakterisierung von Zeitverläufen	33
2.4.2	Spektralanalyse	34
2.4.3	Schmalband- (FFT-) Analyse	36
2.5	Spezielle Luftschallmessungen	39
2.5.1	Messung von Schalldruckpegeln	39
2.5.2	Schalleistungsmessung	39
2.5.3	Messung der Schalldämmung	40
2.5.4	Messung der Absorptionsfläche im Hallraum	41
2.5.5	Messungen im Kundtschen Rohr	41
2.6	Spezielle Körperschallmessungen	42
2.6.1	Messung von Körperschallpegeln	42
2.6.2	Messung von Materialdaten	42
2.6.3	Modalanalyse	44
2.7	Literatur	46

<b>3. Numerische Methoden in der Technischen Akustik</b>	
von M. Ochmann und M. Heckl	48
3.1 Einleitung	48
3.2 Fourierreihen	48
3.2.1 Fourierreihen im Zeitbereich	48
3.2.2 Fourierreihen im Ortsbereich (akustische Holographie)	49
3.3 Methode der finiten Elemente (FEM)	51
3.3.1 Resonanzfrequenzen und Schwingungsformen	51
3.3.2 Erzwungene Bewegungen	55
3.4 Randelementmethode (BEM)	55
3.4.1 Berechnung der Schallabstrahlung	55
3.4.1.1 Auswahl der Elemente	59
3.4.1.2 Behandlung von Singularitäten	59
3.4.2 Berechnung der Streuung	59
3.5 Residualmethoden zur Berechnung der Schallabstrahlung	60
3.5.1 Multipolstrahlersynthese	60
3.5.1.1 Multipole mit gleichem Ursprung	61
3.5.1.2 Multipole mit verschiedenem Ursprung	61
3.5.1.3 Wahl der Gewichtsfunktion	61
3.5.2 Verwandte Methoden	63
3.5.3 Vergleich der verschiedenen Methoden zur Behandlung von akustischen Abstrahl- und Streuproblemen	63
3.6 Schallfelder in inhomogenen Medien	63
3.6.1 Geometrische Akustik, Schallstrahlenberechnung	64
3.6.2 Weitere Methoden	65
3.6.2.1 WKB-Methode	65
3.6.2.2 Parabolische Gleichung	65
3.6.2.3 Gaussian Beam Method	66
3.7 Prognoseverfahren für Spezialfälle	66
3.8 Literatur	66
<b>4. Schallwirkungen beim Menschen und Fragen des Gehörschutzes</b>	
von B. Griefahn und G. Jansen	69
4.1 Einleitung	69
4.2 Anatomie des Ohres	69
4.3 Funktion des Gehörorgans	71
4.3.1 Luftleitung	71
4.3.2 Knochenleitung	72
4.4 Leistungsbereich des Ohres	72
4.4.1 Leistungsgrenzen	72
4.4.2 Bewertung von Unterschieden	73
4.4.3 Richtungshören	73
4.5 Schalltraumatische Hörschäden	73
4.5.1 Akute Hörverluste	73
4.5.2 Die Lärmschwerhörigkeit	74
4.5.3 Das Hören des Lärmschwerhörigen	75
4.5.4 Beurteilung der Lärmschwerhörigkeit	75
4.5.5 Häufigkeit und Risiko	76
4.6 Technischer und persönlicher Schallschutz	77
4.6.1 Wirkung von Gehörschutzmitteln	77
4.6.2 Kriterien für die Auswahl von Gehörschützern	78
4.6.3 Die einzelnen Gehörschutzmittel	79
4.7 Extraaurale Schallwirkungen	80
4.7.1 Vegetative Schallwirkungen	81
4.7.2 Psychosoziale Wirkungen	82
4.7.3 Schlafstörungen	83
4.8 Literatur	84

<b>5. Beurteilung von Geräuschimmissionen (Vorschriften – Normen Richtlinien) von D. Gottlob und R. Kürer</b>	<b>86</b>
5.1 Einleitung	86
5.2 Beurteilungsgrundlagen	86
5.2.1 Momentane Geräuschstärke	86
5.2.2 Mittelwerte	88
5.2.3 Perzentilpegel	89
5.2.4 Mittlerer Maximalpegel	89
5.2.5 Beurteilungspegel	89
5.2.6 Immissionswerte	90
5.2.7 Ermittlung der Geräuschbelastung	91
5.3 Spezielle Beurteilungsverfahren	91
5.3.1 Lautheitspegel, Lautheit	91
5.3.2 Berechnete Lautheit nach Zwicker	92
5.3.3 Perceived Noise Level nach Kryter	93
5.3.4 Noise-rating Kurven	94
5.3.5 Frequenzbewertungskurven	95
5.3.6 Sprachverständlichkeit	97
5.3.7 Bewertung tieffrequenter Geräusche im Immissionsschutz	102
5.4 Quellenbezogene Beurteilungsverfahren	103
5.4.1 Straßenverkehr	103
5.4.1.1 Beurteilungsgrößen	103
5.4.1.2 Rechnerische Ermittlung der Belastung	104
5.4.1.3 Messung von Straßenverkehrsgeräuschen	104
5.4.1.4 Städtebauliche Planung an Straßen	104
5.4.1.5 Lärmschutz an Straßen	105
5.4.1.6 Baulicher Schallschutz	106
5.4.2 Schienenverkehr	109
5.4.2.1 Beurteilungsgrößen	109
5.4.2.2 Rechnerische Ermittlung der Belastung	109
5.4.2.3 Städtebauliche Planung an Schienenwegen	110
5.4.2.4 Lärmschutz an Schienenwegen	110
5.4.2.5 Baulicher Schallschutz	110
5.4.3 Luftverkehr	110
5.4.3.1 Beurteilungsgrößen	110
5.4.3.2 Rechnerische Ermittlung der Fluglärmbelastung nach dem Fluglärmschutzgesetz	111
5.4.3.3 Meßtechnische Ermittlung der Fluglärmbelastung nach DIN 45643	111
5.4.3.4 Städtebauliche Planung und baulicher Schallschutz	112
5.4.4 Industrie-, Gewerbe- und Freizeitanlagen	112
5.4.4.1 Beurteilungsgrößen	112
5.4.4.2 Meßtechnische Ermittlung der Belastung	113
5.4.4.3 Städtebauliche Planung	116
5.4.4.4 Errichtung und Betrieb von Anlagen	116
5.4.4.5 Baulicher Schallschutz	117
5.4.5 Arbeitsplatz	117
5.4.5.1 Beurteilungsgrößen	117
5.4.5.2 Messung der Geräuschimmissionen	118
5.4.5.3 Beurteilung der Geräuschimmissionen	118
5.4.6 Haustechnische Anlagen	119
5.4.6.1 Beurteilungsgrößen	119
5.4.6.2 Anforderungen an haustechnische Anlagen	119
5.4.6.3 Anforderungen an raumlüftungstechnische Anlagen	120
5.5 Literatur	122
<b>6. Messung und Beurteilung der Geräuschemission (Normen – Richtlinien – Gesetze) von G. Hübner</b>	<b>126</b>
6.1 Einleitung	126
6.2 Kennzeichnende physikalische Größen	126

6.2.1	Einleitung	126
6.2.2	Schalleistung, Schalleistungspegel, A-Schalleistungspegel, Band-Schalleistungspegel	127
6.2.2.1	Darstellung der Schalleistung einer Geräuschquelle unter Freifeldbedingungen	127
6.2.2.2	Darstellung der Schalleistung einer Geräuschquelle unter angenäherten Freifeldbedingungen und bei Anwesenheit von Fremdgeräuschen	129
6.2.2.3	Darstellung der Schalleistung einer Geräuschquelle unter Hallraumbedingungen	130
6.2.2.4	Darstellung der Schalleistung einer Geräuschquelle durch Körperschallgrößen	130
6.2.3	Meßflächen-Schalldruckpegel, Meßflächenmaß	131
6.2.4	Ergänzende Kennzeichnung stark zeitlich oder stark örtlich schwankender Geräuschemission	131
6.2.5	Weitere Kenngrößen	133
6.3	Die Messung der Kenngrößen	134
6.3.1	Einleitung	134
6.3.2	Rahmenmeßvorschriften	135
6.3.2.1	Allgemeines	135
6.3.2.2	Die Hüllflächen-Schalldruck-Messung unter angenäherten Freifeldbedingungen	137
6.3.2.3	Die Messung unter Hallfeldbedingungen (Hallraumverfahren)	141
6.3.2.4	Die Messung mit Hilfe einer Vergleichsschallquelle	144
6.3.2.5	Die Schallintensitätsmessung	144
6.3.2.6	Die Messung in üblichen Maschinenaufstellungsräumen oder im Freien („in situ“)	147
6.3.2.7	Vergleichbare Geräuschemissionswerte	148
6.3.3	Meßvorschriften für spezielle Maschinenarten und Fahrzeuge -ergänzende Festlegungen über Betriebs- und Aufstellungsbedingungen	149
6.4	Geräusch-Emissions-Angaben und -Klassifizierung	149
6.5	Literatur	151
<b>7.</b>	<b>Geräusche elektrischer Maschinen von G. Hübner</b>	<b>160</b>
7.1	Schallentstehung bei rotierenden elektrischen Maschinen	160
7.1.1	Magnetische Geräusche	160
7.1.1.1	Das Luftspaltfeld und die hiervon ausgehenden Wechselkräfte	161
7.1.1.2	Das mechanische Schwingungsverhalten der rotierenden elektrischen Maschine und die Berechnung ihrer erzwungenen Schwingungen	165
7.1.1.3	Die Schallabstrahlung	168
7.1.2	Aerodynamische Geräusche	169
7.1.3	Lager- und Bürstengeräusche	171
7.1.4	Sekundäre Maßnahmen zur Geräuschminderung	173
7.1.5	Geräuschmeßvorschrift und Geräuschgrenzwerte	174
7.2	Schallentstehung bei Transformatoren	176
7.2.1	Magnetische Geräusche	176
7.2.2	Geräuschminderungsmaßnahmen	178
7.3	Literatur	179
<b>8.</b>	<b>Schallentstehung und Schallminderung bei Diesel- und Ottomotoren von M. Heckl</b>	<b>182</b>
8.1	Einleitung	182
8.2	Auspuffgeräusch	182
8.2.1	Entstehungsmechanismen	182
8.2.2	Mündungsgeräusch und seine Minderung durch Schalldämpfer	184
8.2.3	Abstrahlung vom Auspuffstrang	186
8.3	Ansauggeräusch	186
8.4	Kühllüfter	187

8.5	Schallabstrahlung vom Motorblock	187
8.5.1	Verbrennung	187
8.5.2	Kolbenkippen	189
8.5.3	Unwuchtkräfte	190
8.5.4	Sonstige Schallquellen	190
8.5.5	Erfahrungsformeln für Motorgeräusche	190
8.6	Schallschutzmaßnahmen	192
8.6.1	Primärer Schallschutz	192
8.6.2	Sekundärer Schallschutz	192
8.7	Literatur	193
<b>9.</b>	<b>Strömungsgeräusche von B. Stüber, Ch. Mühle und K.R. Fritz</b>	<b>195</b>
9.1	Einleitung	195
9.2	Schallentstehung durch Strömungen	195
9.2.1	Quellterme	195
9.2.2	Kavitation	195
9.2.2.1	Kavitationseinsatz	196
9.2.2.2	Kavitationsformen	198
9.2.2.3	Theoretische Behandlung	198
9.2.2.4	Kavitierende Düsen	199
9.2.2.5	Geräuschminderung	200
9.2.3	Angeströmte Kreiszylinder	201
9.2.3.1	Beschreibung des Strömungsfeldes	202
9.2.3.2	Schallentstehung (Hiebtonbildung)	203
9.2.3.3	Berechnung der Schallabstrahlung	204
9.2.3.4	Geräuschminderung	205
9.2.4	Turbulenter Freistrah	206
9.2.5	Turbulente Grenzschicht	207
9.3	Rohrleitungen	208
9.3.1	Schallabstrahlung in die Rohrleitung	208
9.3.2	Schalleistung der Rohrleitung	209
9.3.3	Innerer Schalleistungspegel und Schalldruckpegel	210
9.3.4	Schallpegelabnahme in Rohrleitungen	210
9.3.4.1	Anregung durch Luftschall	210
9.3.4.2	Anregung durch Flüssigkeitsschall	211
9.3.5	Schallpegelabnahme auf Rohrleitungen bei Körperschallanregung	211
9.3.6	Schalldämmung	212
9.3.6.1	Kreisförmige Rohre	212
9.3.6.2	Rechteckkanäle	213
9.3.7	Abstrahlmaße	213
9.3.7.1	Kreisförmige Rohre	213
9.3.7.2	Rechteckkanäle	214
9.3.8	Schalldämmende Ummantelung von kreisförmigen Rohren	214
9.4	Ventilatoren	215
9.4.1	Kennzeichnung	215
9.4.2	Schallentstehung	217
9.4.3	Näherungsweise Berechnung der Schallabstrahlung	219
9.4.4	Geräuschminderung	221
9.5	Pumpen	223
9.5.1	Beschreibung der wichtigsten Pumpenarten	223
9.5.2	Schallentstehung	225
9.5.2.1	Hydrostatische Pumpen	225
9.5.2.2	Hydrodynamische Pumpen (Kreiselpumpen)	227
9.5.3	Näherungsweise Berechnung der Schallabstrahlung	227
9.5.3.1	Hydrostatische Pumpen	227
9.5.3.2	Hydrodynamische Pumpen	229
9.5.4	Geräuschminderung	230
9.5.4.1	Hydrostatische Pumpen	230
9.5.4.2	Hydrodynamische Pumpen (Kreiselpumpen)	231
9.5.4.3	Maßnahmen am Leitungssystem	231

9.6	Verwirbelte Ausströmung und Umströmung	232
9.6.1	Schallentstehung	232
9.6.2	Näherungsweise Berechnung der Schallabstrahlung	232
9.6.3	Geräuschminderung	233
9.7	Armaturen	234
9.7.1	Schallentstehung	234
9.7.2	Näherungsweise Berechnung der Schallabstrahlung	236
9.7.3	Geräuschminderung	238
9.8	Wassgeräusche an Kühltürmen	238
9.9	Industrielle Brenner	239
9.9.1	Schallentstehung	239
9.9.2	Näherungsweise Berechnung der Schallabstrahlung	241
9.9.3	Geräuschminderung	242
9.10	Literatur	242
<b>10.</b>	<b>Geräusche von Zahnradgetrieben von M. Heckl</b>	<b>248</b>
10.1	Einleitung	248
10.2	Geräuscentstehungsmechanismen	248
10.2.1	Entstehung von Wechselbewegungen beim Rollen und Wälzen	248
10.2.2	Geräuscentstehung bei Zahnrädern	250
10.2.2.1	Zahnfehler	250
10.2.2.2	Parameteranregung durch wechselnde Zahnfedersteife	251
10.2.2.3	Verformung von Wellen, Lagern und Gehäusen	254
10.2.2.4	Eintrittstoß	254
10.2.2.5	Getrieberasseln	254
10.2.2.6	Sonstige Mechanismen	254
10.3	Übertragung und Abstrahlung von Getriebe geräuschen	254
10.4	Verbesserungsmaßnahmen	255
10.4.1	Getriebeauslegung	255
10.4.2	Zahnflankenkorrekturen	256
10.4.3	Sekundärmaßnahmen	257
10.5	Erfahrungswerte	257
10.5.1	Schalleistung	257
10.6	Literatur	259
<b>11.</b>	<b>Geräusche von Metallbearbeitungsmaschinen von M. Heckl</b>	<b>261</b>
11.1	Einleitung	261
11.2	Spanende Werkzeugmaschinen	261
11.2.1	Drehmaschinen und Fräsmaschinen	261
11.2.1.1	Entstehungsmechanismen	261
11.2.1.2	Erfahrungswerte	262
11.2.2	Maschinen zum Sägen, Schleifen, Bohren	263
11.2.2.1	Entstehungsmechanismen	263
11.2.2.2	Erfahrungswerte	264
11.3	Schneidpressen (Stanzen)	264
11.3.1	Entstehungsmechanismen	264
11.3.2	Erfahrungswerte	265
11.3.3	Verbesserungsmaßnahmen	268
11.4	Schmiedepressen und Schmiedehämmer	268
11.4.1	Entstehungsmechanismen	268
11.4.2	Erfahrungswerte	270
11.5	Sonstige Geräuschursachen bei der Metallbearbeitung	271
11.6	Literatur	271
<b>12.</b>	<b>Geräusche bei der Holzverarbeitung von H.-G. Wiechert und H. Kraus</b>	<b>273</b>
12.1	Einleitung	273
12.2	Allgemeine Schallentstehungsmechanismen	273
12.2.1	Leerlaufgeräusch	273

12.2.2	Bearbeitungsgeräusch	274
12.3	Prinzipien der Lärminderung	274
12.3.1	Lärminderung an der Schallquelle	274
12.3.2	Lärminderung auf den Übertragungswegen	275
12.3.3	Lärminderung durch Verfahrensänderung	276
12.4	Stand der Lärmbekämpfungstechnik an Einzelmaschinen	276
12.4.1	Standardmaschinen	276
12.4.2	Maschinen der Möbelindustrie	280
12.5	Sägewerke	283
12.5.1	Zulässige Schallimmissionen	283
12.5.2	Kurzbeschreibung der Sägewerkstechnik	283
12.5.3	Grobe Abschätzung der zu erwartenden Geräuschabstrahlung von Sägewerken	284
12.5.3.1	Vorbemerkungen	284
12.5.3.2	Geräuschabstrahlung von Sägewerken	284
12.5.4	Wichtigste Geräuscherzeuger und Möglichkeiten zur Lärminderung	286
12.5.4.1	Rotierende Sägeblätter	286
12.5.4.2	Elektromotoren	286
12.5.4.3	Emissionswerte der wichtigsten sägewerksspezifischen Geräuscherzeuger	287
12.6	Erschütterungen bei Sägewerken	287
12.6.1	Vorbemerkungen	287
12.6.2	Mögliche Schutzmaßnahmen	287
12.7	Abschließende Bemerkung	287
12.8	Literatur	290

### **13. Geräuschemissionen und -immissionen von Baumaschinen, Baugeräten und Baustellen von A. Böhm und O. Strachotta**

		291
13.1	Einleitung	291
13.2	Deutsches Regelwerk	291
13.2.1	Immissionsrichtwerte und Meßverfahren	291
13.2.2	Emissionsrichtwerte für Maschinen und Meßverfahren	292
13.2.3	Zulässige Beurteilungspegel am Arbeitsplatz und Meßverfahren	293
13.2.4	Umweltzeichen für lärmarme Baumaschinen, Baugeräte und Sondermaschinen	294
13.3	Europäisches Regelwerk für die EG-Staaten	297
13.3.1	Einheitliche Vorgehensweise bei der Geräuschemessung und -kennzeichnung	297
13.3.2	Zulässige Geräuschemissionspegel und Geräuschmeßverfahren	298
13.3.3	EG-Baumusterprüfbescheinigung und EG-Prüfprotokoll über die Messung der Geräuschemissionen	300
13.3.4	EG-Konformitätsbescheinigung und EG-Kennzeichnung der Geräuschemissionen	301
13.3.5	Hinweise auf weitere und internationale Regelwerke	301
13.4	Vergleich von Geräuschmeßverfahren	302
13.4.1	Meßgrößen für Mittelungsverfahren	302
13.4.2	Statische und dynamische Geräuschmeßverfahren	302
13.4.3	Intensitätsmeßverfahren und Hüllflächenverfahren	302
13.5	Geräuschemissionskennwerte	305
13.5.1	Schalleistungspegel	305
13.5.2	Relative Spektren	306
13.6	Schalltechnische Planung und Einrichtung von Baustellen	307
13.7	Geräuschminderung an Baumaschinen	308
13.8	Literatur	309

### **14. Fluglärm von W. Dobrzynski, H. Heller, K. Matschat, E.-A. Müller, G. Neuwerth, F. Obermeier, K.-J. Schultz und W. Splettstößer**

14.1	Schallemission	312
14.1.1	Flugzeuge mit Strahltriebwerken	312
14.1.1.1	Anteile der Triebwerkskomponenten an der Schallerzeugung	312
14.1.1.2	Schallerzeugung durch den Düsenstrahl	312



14.1.1.3	Schallerzeugung durch Verdichter und Fan	315
14.1.1.4	Schallemission ausgewählter Flugzeuge	316
14.1.1.5	Ausblick	318
14.1.2	STOL- und VTOL-Flugzeuge	318
14.1.3	Flugzeuge mit Propellertriebwerken	320
14.1.3.1	Schallerzeugung durch den Propeller bei ungestörter Zuströmung	320
14.1.3.2	Schallerzeugung durch den Propeller bei gestörter Zuströmung	322
14.1.3.3	Schallerzeugung bei gegendrehenden Propellern	325
14.1.4	Hubschrauber	326
14.1.4.1	Hauptrotorlärm	327
14.1.4.2	Heckrotorlärm	329
14.1.4.3	Berechnung des Rotorlärms	330
14.2	Schallimmission	333
14.2.1	Einzelgeräusch	333
14.2.2	Abhängigkeit der Kenngrößen des Einzelgeräusches vom Vorbeiflugabstand $d$ und von der Fluggeschwindigkeit $v$	334
14.2.3	Rechenverfahren zur Ermittlung der Fluglärmimmission in der Umgebung von Flugplätzen	334
14.3	Fluglärmbewertung	335
14.4	Der Überschallknall	336
14.4.1	Definition und Beschreibung	336
14.4.2	Erläuterungen zu den den Überschallknall beschreibenden Größen	338
14.4.3	Der Knallteppich	339
14.4.4	Die Wirkung des Überschallknalls auf den Menschen	340
14.4.4.1	Lautstärke des Überschallknalls	341
14.4.4.2	Störwirkung von Überschallknallen	341
14.4.5	Die Wirkung des Überschallknalls auf Tiere	341
14.4.6	Die Wirkung des Überschallknalls auf Bauwerke und auf den Erdboden	341
14.4.7	Bibliographien	342
14.5	Literatur	342
<b>15.</b>	<b>Straßenverkehrslärm von L. Schreiber</b>	<b>348</b>
15.1	Die Bedeutung des Straßenverkehrs als Lärmquelle	348
15.2	Das einzelne Fahrzeug als Schallquelle	348
15.2.1	Antriebsgeräusche	348
15.2.2	Rollgeräusch	349
15.2.3	Windgeräusche	349
15.2.4	Grenzwerte für die Schallemission von Kraftfahrzeugen	350
15.3	Straßen als Schallquellen	350
15.3.1	Maße und Grenzwerte für die Stärke der Schallimmission durch Straßenverkehr	350
15.3.2	Berechnung des Beurteilungspegels von Straßenverkehrslärm	351
15.4	Vorschriften zum Schutz gegen Straßenverkehrslärm	353
15.5	Maßnahmen zum Schutz gegen Verkehrslärm	353
15.6	Literatur	354
<b>16.</b>	<b>Geräusche und Erschütterungen aus dem Schienenverkehr von R. Wettschurek und G. Hauk</b>	<b>355</b>
16.1	Einleitung	355
16.2	Luftschall bei Eisenbahnen	355
16.2.1	Begriffsbestimmungen	355
16.2.2	Schallemissionen	356
16.2.2.1	Fahrzeuge	357
16.2.2.2	Fahrweg	363
16.2.2.2.1	Oberbau	363
16.2.2.2.2	Brücken	369
16.2.2.2.3	Bahnübergänge	375
16.2.2.3	Großflächige Bahnanlagen	375
16.2.2.3.1	Rangierbahnhöfe	375

	16.2.2.3.2 Umschlagbahnhöfe	377
	16.2.2.3.3 Sonstige Anlagen (Personenbahnhöfe usw.)	378
16.2.3	Schallimmissionen	379
16.2.3.1	Schallimmissionen an großflächigen Bahnanlagen	379
16.2.3.2	Schallimmissionen an Strecken	379
	16.2.3.2.1 Ausbreitung im Freifeld	379
	16.2.3.2.2 Aktive Schallschutzmaßnahmen	379
	16.2.3.2.3 Passive Schallschutzmaßnahmen	383
16.2.3.3	Fahrgeräusche in Fahrzeugen	386
	16.2.3.3.1 Für Reisende	386
	16.2.3.3.2 Für Personal	387
16.2.4	Wirkung und Bewertung	388
	16.2.4.1 Schienenbonus	388
	16.2.4.2 Pegelzuschläge (Impuls-/Tonzuschlag)	389
16.2.5	Gesetzliche Regelungen	389
16.2.6	Messungen	390
16.3	Körperschall/Erschütterungen bei Eisenbahnen	390
16.3.1	Allgemeines, Begriffsbestimmungen	390
16.3.2	Körperschallentstehung	394
16.3.3	Körperschallausbreitung im Boden	400
16.3.4	Körperschalleinleitung in Gebäude und Körperschallausbreitung im Inneren von Gebäuden	401
16.3.5	Sekundärer Luftschall	403
16.3.6	Beurteilung	404
	16.3.6.1 Erschütterungen	404
	16.3.6.2 Sekundärer Luftschall	405
16.3.7	Schutzmaßnahmen im Bereich der Körperschallentstehung	405
16.3.8	Schutzmaßnahmen im Bereich der Körperschallausbreitung im Boden	412
16.3.9	Schutzmaßnahmen an Gebäuden	413
16.3.10	Prognose	413
16.4	Luftschall und Körperschall/Erschütterungen bei Straßenbahnen	414
16.5	Literatur	414

## **17. Lärmbekämpfung auf Schiffen von K. Geicke** . . . . . 418

17.1	Akustische Kriterien	418
17.2	Prinzipielle Vorgehensweise	419
17.3	Grundrißplanung	420
17.4	Schallquellen	421
17.4.1	Schiffsantriebsmaschinen	421
	17.4.1.1 Dieselmotore	421
	17.4.1.2 Getriebe	422
	17.4.1.3 Gasturbinen	423
	17.4.1.4 E-Motore	424
	17.4.1.5 Dampfturbinen	424
17.4.2	Propeller	424
	17.4.2.1 Manövrierhilfen	425
	17.4.2.2 Vortriebsanlagen mit Manövrierfunktion	425
17.4.3	Hilfsaggregate	425
17.5	Isolationsmaßnahmen an den Schallquellen	426
17.5.1	Elastische Lagerung	427
17.5.2	Kapseln	429
17.5.3	Schalldämpfer	430
17.5.4	Rohrisolierungen	431
17.5.5	Entdröhnung	432
17.5.6	Schwingungstilgung	432
17.6	Körperschallausbreitung im Schiffskörper	433
17.7	Schallschutzmaßnahmen in Aufenthaltsräumen	435
17.7.1	Schallabsorption	435

17.7.2	Schalldämmung	435
17.7.3	Abstrahlung von Körperschall	436
17.7.4	Raum-in-Raum-Bauweise	438
17.7.5	Elastisch gelagertes Deckshaus	438
17.8	Beispiele von Luftschallpegeln auf Schiffen	439
17.9	Literatur	439
<b>18.</b>	<b>Schallausbreitung im Freien</b> von L. Schreiber	<b>440</b>
18.1	Vorbemerkungen	440
18.2	Verlustlose Schallausbreitung	440
18.2.1	Unbegrenztes Schallfeld	441
18.2.2	Schallquelle über dem Boden, Reflexion	442
18.2.3	Abschirmung durch Hindernisse	443
18.2.4	Diffuse Streuung	444
18.3	Zusatzdämpfung durch Absorption (Dissipation) der Luft	444
18.4	Einfluß von Bodenbeschaffenheit, Bewuchs und Bebauung auf die Schallausbreitung	444
18.4.1	Zusatzdämpfung bei Schallausbreitung über Boden und Bewuchs	444
18.4.2	Zusatzdämpfung bei Schallausbreitung durch Bewuchs hindurch	446
18.4.3	Zusatzdämpfung durch Bebauung	447
18.5	Einfluß von Inhomogenitäten der Luft	447
18.5.1	Windgeschwindigkeitsgradient	447
18.5.2	Temperaturgradient	448
18.5.3	Turbulenz	449
18.6	Berücksichtigung des Zusammenwirkens der verschiedenen Einflüsse auf die Schallausbreitung bei der Schallschutzplanung	449
18.6.1	Einzel-schallquellen (Punktschallquellen)	450
18.6.1.1	Richtwirkungsmaß	450
18.6.1.2	Raumwinkelmaß	450
18.6.1.3	Reflexionen	450
18.6.1.4	Abstandsmaß	451
18.6.1.5	Luftabsorptionsmaß	451
18.6.1.6	Boden- und Meteorologiedämpfungsmaß	451
18.6.1.7	Bewuchsdämpfungsmaß	451
18.6.1.8	Bebauungsdämpfungsmaß	451
18.6.1.9	Abschirmung	452
18.6.2	Linien- und Flächenschallquellen	452
18.7	Literatur	453
<b>19.</b>	<b>Schallabsorption</b> von F.P. Mechel	<b>454</b>
19.1	Einleitung	454
19.2	Absorptionsmaterialien	454
19.2.1	Poröse Absorber	455
19.2.1.1	Struktur von Faserabsorbern	455
19.2.1.2	Wirkungsweise von Faserabsorbern	455
19.2.1.3	Berechnung der Ausbreitungskonstanten und des Wellenwiderstandes	456
19.2.1.4	Kennwerte aus Meßwert-Regressionen	466
19.2.1.5	Sonstige Einflüsse auf die Kennwerte	468
19.2.1.6	Kenndaten poröser Absorber	469
19.2.2	Resonanzabsorber	472
19.2.2.1	Federsteife, Schwingmasse und Resonanzfrequenz	473
19.2.2.2	Federimpedanz	474
19.2.2.3	Massenimpedanz	474
19.2.2.4	Impedanz und Absorptionsquerschnitt	479
19.2.2.5	Resonatoren in Gitteranordnung	481
19.2.3	Plattenabsorber	481
19.2.3.1	Biege-weiche Plattenabsorber	481

19.2.3.2	Plattenabsorber mit porösem Absorber hinterlegt	482
19.2.3.3	Biegesteife Plattenabsorber mit federnder Einspannung	483
19.2.3.4	Elastische Platten	483
19.3	Berechnung der Schallabsorption	485
19.3.1	Senkrechter Schalleinfall	485
19.3.1.1	Poröser Absorber unendlicher Schichtdicke	485
19.3.1.2	Poröser Absorber endlicher Schichtdicke vor schallharter Wand	486
19.3.1.3	Absorberschicht in Abstand vor schallharter Wand	486
19.3.1.4	Platten, Folien und Stoffbespannung vor schallharter Wand	488
19.3.2	Schräger Schalleinfall	488
19.3.2.1	Schräger Einfall auf poröse Absorber	488
19.3.2.2	Schräger Einfall auf Absorber endlicher Schichtdicke vor schallharter Wand	489
19.3.3	Diffuser Schalleinfall	490
19.4	Zur Dimensionierung von Absorberschichten	493
19.5	Durch Schallabsorption erreichbare Verbesserung	498
19.6	Schlußbemerkung	499
19.7	Literatur	499

## 20. Schalldämpfer von F.P. Mechel . . . . . 501

20.1	Kanalformen	501
20.2	Dämpfungsmaße	501
20.3	Theoretische Grundlagen	503
20.3.1	Kraftgleichung	503
20.3.2	Leitwertvektor	503
20.3.3	Energiesatz	503
20.3.4	Wellengleichung	504
20.3.5	Randbedingungen	504
20.3.6	Zusammenhang Dämpfungsmaß – Dämpfungsexponent	505
20.4	Rechteckkanal, exakte Lösung	505
20.4.1	Auskleidung mit lokal wirkendem Wandleitwert	505
20.4.2	Auskleidung mit lateralem Absorber	508
20.4.3	Vergleich von kassettierten und nichtkassettierten Auskleidungen	509
20.5	Näherungsweise Berechnung der Kanaldämpfung aus dem Wandleitwert	509
20.5.1	Relativer Fehler der Näherungen	509
20.5.2	Näherungsformel von Piening	509
20.5.3	Näherungsformeln für Gl. (21)	510
20.6	Querverteilung des Schallfelds im Kanal	512
20.7	Andere Formen des Querschnitts und der Auskleidung	516
20.7.1	Kreisförmiger Querschnitt	516
20.7.2	Näherungsformel für den runden Kanal	518
20.7.3	Unsymmetrische Kanalauskleidung	519
20.7.4	Andere Auskleidungen	519
20.7.5	Kulissen-Schalldämpfer	521
20.8	Zusatzdämpfung an Querschnitts- und Richtungsänderungen	527
20.8.1	Einlaßdämpfung	527
20.8.2	Auslaßdämpfung	527
20.8.3	Winkeldämpfung	529
20.8.4	Dämpfung an Querschnittsänderungen	530
20.9	Frequenzkurven der Dämpfung	532
20.9.1	Der normierte Wandleitwert	532
20.9.2	Dämpfungskurven für kassettierte poröse Absorber	533
20.9.3	Dämpfungskurven für laterale poröse Absorber	536
20.9.4	Die breitbandige Kanalauskleidung	538
20.10	Einfluß der Strömung	539
20.11	Einfluß der Temperatur	543
20.12	Zur technischen Ausführung von Schalldämpfern	544
20.13	Literatur	544

<b>21. Schalldämmung in Gebäuden</b>	<b>von K. Gösele</b>	<b>547</b>
21.1	Luftschalldämmung	547
21.1.1	Kennzeichnung	547
21.1.2	Messung	548
21.1.3	Verhalten einschaliger Bauteile	549
21.1.3.1	Grundsätzliches Verhalten	549
21.1.3.2	Verhalten ausgeführter Wände	550
21.1.4	Verhalten doppelschaliger Bauteile	552
21.1.4.1	Grundsätzliches Verhalten	552
21.1.4.2	Ausbildung der Dämmschicht	554
21.1.4.3	Schallbrücken	555
21.1.4.4	Einfluß der Schalen	555
21.1.4.5	Praktisch ausgeführte Doppelwände	555
21.1.4.6	Verkleidungen	556
21.1.4.7	Fenster	557
21.1.5	Schall-Längsleitung	557
21.1.6	Undichtigkeiten	559
21.1.6.1	Einfache Schlitzte	559
21.1.6.2	Dichtungsstoffe	559
21.1.6.3	Akustische Filter	560
21.2	Trittschalldämmung	561
21.2.1	Messung und Kennzeichnung von Decken	561
21.2.2	Kennzeichnung von Deckenaufbauten	562
21.2.3	Verhalten von Decken ohne Auflagen	563
21.2.4	Verhalten von Gehbelägen	564
21.2.5	Verhalten von schwimmenden Estrichen	565
21.2.6	Verhalten üblicher Decken	566
21.3	Haustechnische Anlagen	567
21.3.1	Installationsgeräusche	567
21.3.1.1	Kennzeichnung der Armaturengeräusche	567
21.3.1.2	Geräuschenstehung	567
21.3.1.3	Rohrisolierung	568
21.3.2	Heizungsgeräusche	568
21.3.3	Aufzugsgeräusche	569
21.4	Literatur	569
<b>22. Körperschalldämmung und -dämpfung</b>	<b>von M. Heckl und J. Nutsch</b>	<b>571</b>
22.1	Einleitung	571
22.2	Isolation bei tiefen Frequenzen (elastische Lagerung)	571
22.2.1	Abstimmfrequenz	572
22.2.2	Ausführung elastischer Lagerungen	573
22.2.2.1	Federsteife	573
22.2.2.2	Dynamische Masse	577
22.2.2.3	Spezielle Lagerungen	579
22.2.3	Dämmwirkung einer elastischen Lagerung	579
22.3	Körperschalldämmung	581
22.3.1	Entfernungsabnahme	581
22.3.2	Materialwechsel, Querschnittssprünge und Umlenkungen	583
22.4	Körperschalldämpfung	584
22.4.1	Verlustfaktor von verschiedenen Materialien und Konstruktionen	585
22.4.2	Kombinationen von Materialien mit großen und kleinen Verlustfaktoren	587
22.4.3	Dämpfung an Kontaktflächen	588
22.4.4	Kombination von Dämmung und Dämpfung	590
22.4.4.1	Körperschallpegelminderung durch Zusatzdämpfung	590
22.4.4.2	Körperschallminderung durch Kombination von Dämmung und Dämpfung, Statistische Energieanalyse (SEA)	590
22.5	Abstrahlung von Körperschall	592

22.6	Charakterisierung der Emissionsstärke von Körperschallquellen	593
22.7	Literatur	594
<b>23.</b>	<b>Raumakustik von H. Kuttruff</b>	<b>596</b>
23.1	Grundtatsachen der Schallausbreitung in Räumen	596
23.1.1	Vorbemerkung	596
23.1.2	Wellentheorie der Raumakustik	597
23.1.3	Geometrische Raumakustik	598
23.1.3.1	Schallreflexion an ebenen Flächen, Spiegelschallquellen	598
23.1.3.2	Schallausbreitung in Räumen mit diffus reflektierenden Wänden	601
23.1.4	Nachhall und stationäre Energiedichte in Räumen mit diffusum Schallfeld	601
23.2	Zur subjektiven Wirkung räumlicher Schallfelder	603
23.2.1	Einzelne Rückwürfe	604
23.2.2	Rückwurffolgen	606
23.2.2.1	Sprachverständlichkeit und Durchsichtigkeit	606
23.2.2.2	Räumlichkeitseindruck	607
23.2.2.3	Echostörungen	609
23.2.3	Nachhall	609
23.3	Entwurfsmethoden der Raumakustik	610
23.3.1	Zeichnerische Konstruktion von Schallstrahlen	610
23.3.2	Nachhallberechnung	610
23.3.3	Raumakustische Modelluntersuchungen	613
23.3.4	Digitale Simulation der Schallausbreitung	614
23.4	Grundsätze der raumakustischen Planung	616
23.4.1	Räume für Sprachdarbietungen	616
23.4.2	Konzertsäle	617
23.4.3	Opernhäuser	618
23.4.4	Mehrzwecksäle und Räume mit veränderlicher Nachhallzeit	619
23.4.5	Kirchen	620
23.5	Raumakustische Messungen	621
23.6	Literatur	622
<b>24.</b>	<b>Aktive Lärminderung (Antischall) von J. Scheuren</b>	<b>625</b>
24.1	Einführung	625
24.2	Anmerkungen zur Geschichte	625
24.3	Struktur der allgemeinen Problemstellung	626
24.4	Aspekte der Signalverarbeitung	628
24.5	Theoretische Überlegungen zur Wirkungsweise aktiver Systeme	630
24.5.1	Aktive Beeinflussung der Wellenausbreitung	631
24.5.2	Modale Betrachtungsweise	635
24.5.3	Quellnachbildung	637
24.5.4	Stabilisierung selbsterregter Systeme	638
24.5.5	Energie- und Leistungsbetrachtungen	638
24.6	Weitere Anwendungen	639
24.7	Elektromechanische Wandler als Stellglieder	640
24.8	Zusammenfassung und Ausblick	641
24.9	Literatur	641
<b>25.</b>	<b>Beschallungstechnik von H. Frisch</b>	<b>646</b>
25.1	Einleitung	646
25.2	Verstärkungsanlagen für Sprache und Musik	646
25.2.1	Verstärkungsanlagen in Räumen	647
25.2.1.1	Zentrale Beschallung	647
25.2.1.2	Dezentrale Beschallung	648
25.2.1.3	Prozessorgesteuerte Beschallung	648
25.2.2	Verstärkungsanlagen im Freien	649
25.2.2.1	Zentrale Beschallung von Freiflächen	649
25.2.2.2	Beschallung mit Video-Unterstützung im Freien	650

25.3	Unterstützungsanlagen für Sprache und Musik	650
25.3.1	Sprachunterstützungsanlagen	651
25.3.1.1	Mehrkanalige Bühnenunterstützungsanlage	651
25.3.2	Musikunterstützungsanlagen	652
25.4	Anlagen zur Simulation raumakustischer Gegebenheiten	653
25.4.1	Nachhallzeitverlängerung	653
25.4.2	Raumakustik-Manipulation	653
25.5	Lautsprecher	654
25.5.1	Elektromechanische Wandlerarten	654
25.5.1.1	Piezoelektrischer Wandler	654
25.5.1.2	Dynamischer Wandler	654
25.5.2	Richtcharakteristik eines Konus-Treibers	655
25.5.3	Tieftonlautsprecher	655
25.5.4	Mittel-Hochton-Lautsprecher	657
25.5.4.1	Mittel-Hochton-Treiber	657
25.5.4.2	Mittel-Hochton-Trichter	657
25.6	Literatur	658
	Anhang	659
<b>Sachverzeichnis</b>		<b>661</b>