

Technischer Lärmschutz

Grundlagen und praktische Maßnahmen
an Maschinen und in Arbeitsstätten zum Schutz
des Menschen vor Lärm und Schwingungen

herausgegeben von Werner Schirmer

VDI VERLAG

Inhalt

Hinweise für den Leser	XVI
Wichtige Formelzeichen und Einheiten	XVII
1 Lärmschutzforderungen an Arbeitsmittel und Arbeitsstätten	
von <i>W. Parthey</i>	1
1.1 Einführung	1
1.2 Struktur der Lärmschutzvorschriften im Zusammenhang mit dem EU-Recht im Überblick	2
1.3 Forderungen an die Beschaffenheit und das Inverkehrbringen von Maschinen	4
1.4 Forderungen an Arbeitsstätten	7
1.5 Schrifttum	10
2 Größen und Meßverfahren zur Kennzeichnung von Geräuschen und Geräuschquellen	
von <i>K. Biehn</i>	14
2.1 Einführung	14
2.2 Kennzeichnung der physikalischen Eigenschaften von Geräuschen	14
2.2.1 Schalldruck	14
2.2.2 Schalldruckpegel	15
2.2.3 Bandschalldruckpegel	16
2.3 Größen zur Kennzeichnung der Schallimmission	17
2.3.1 Überblick	17
2.3.2 Bewerteter Schalldruckpegel	18
2.3.3 Äquivalenter Dauerschallpegel, Taktmaximal-Mittelungspegel	20
2.3.4 Beurteilungspegel	21
2.3.5 Spitzen-Schalldruckpegel	22
2.3.6 Einzelereignis-Schalldruckpegel	22
2.3.7 Lärmdosis	22
2.4 Größen zur Kennzeichnung der Schallemission	23
2.4.1 Überblick	23
2.4.2 Schalleistungspegel, Richtwirkungsmaß	23
2.4.3 Schallintensitätspegel	24
2.4.4 Schallenergiepegel	25
2.4.5 Schalldruckpegel an festgelegten Meßorten	25
2.4.6 Emissions-Schalldruckpegel am Arbeitsplatz	25
2.4.7 Geräuschemissionsangabe	26
2.5 Rechenoperationen mit Schallpegelwerten	27
2.5.1 Addition	27
2.5.2 Subtraktion	29
2.5.3 Mittelwertbildung	29

2.6	Verfahren der Immissionsmessung	29
2.6.1	Vorbemerkungen	29
2.6.2	Vorbereitung der Messung	30
2.6.3	Meßdurchführung	30
2.6.4	Meßauswertung	31
2.7	Verfahren der Schalleistungsmessung	32
2.7.1	Überblick	32
2.7.2	Freifeldverfahren	35
2.7.2.1	Meßprinzip	35
2.7.2.2	Meßunsicherheit	36
2.7.3	Hallraumverfahren	39
2.7.3.1	Meßprinzip	39
2.7.3.2	Meßunsicherheit	39
2.7.4	Vergleichsverfahren	42
2.7.4.1	Meßprinzip	42
2.7.4.2	Meßunsicherheit	43
2.7.5	Kanalverfahren	43
2.7.5.1	Meßprinzip	43
2.7.5.2	Meßunsicherheit	43
2.7.6	Intensitätsverfahren	44
2.7.6.1	Meßprinzip	44
2.7.6.2	Meßunsicherheit	46
2.8	Verfahren zur Nachprüfung angegebener Geräuschemissionswerte	48
2.8.1	Nachprüfverfahren für Einzelmaschinen	48
2.8.2	Nachprüfverfahren für Maschinenlose	48
2.9	Verfahren zur Geräuschquellenfindung	51
2.9.1	Überblick	51
2.9.2	Voruntersuchung	51
2.9.3	Verfahren ohne Änderungen an der Maschine	52
2.9.3.1	Schalldruckpegelmessung auf der Meßfläche	52
2.9.3.2	Nahfeldmessung	52
2.9.3.3	Körperschallmessung	52
2.9.3.4	Intensitätsmessung	52
2.9.3.5	Frequenzanalyse	53
2.9.4	Verfahren mit Änderungen an der Maschine	54
2.10	Schrifttum	54
3	Meßtechnik von <i>E. Seidel</i>	58
3.1	Einführung	58
3.2	Schalldruckpegelmessung	59
3.2.1	Mikrofone	59
3.2.2	Geräte zur Schalldruckpegel- und Schalldosismessung	60
3.2.3	Aufbau und Funktion des Schallpegelmessers	61
3.2.4	Hilfsmittel	62
3.2.4.1	Kalibriergeräte	62
3.2.4.2	Meßschallquellen	64
3.2.4.3	Hilfsmittel zur Verringerung von Störeinflüssen	64
3.2.5	Handhabung der Schallpegelmesser	66
3.2.6	Fehler und Abhilfemaßnahmen	66

3.3	Messung von Größen, die zur Schallentstehung beitragen	67
3.3.1	Einführung	67
3.3.2	Schwingungs- und Körperschallmessung	68
3.3.2.1	Wandler	68
3.3.2.2	Geräte zur Schwingungsmessung	70
3.3.2.3	Aufbau und Funktion der Schwingungsmeßgeräte	70
3.3.2.4	Hilfsmittel	71
3.3.2.5	Handhabung der Schwingungsmeßgeräte	73
3.3.2.6	Fehler und Abhilfemaßnahmen	75
3.3.3	Kraftmessung	76
3.3.4	Dehnungsmessung	77
3.4	Speicherung von Meßsignalen	78
3.4.1	Einführung	78
3.4.2	Arten von Magnetbandspeichern	79
3.4.3	Handhabung der Magnetbandspeicher	80
3.4.3.1	Herstellung der Signalaufzeichnung	80
3.4.3.2	Auswertung der Signalaufzeichnung	81
3.4.4	Fehler bei der Magnetbandspeicherung	83
3.4.5	Digitalspeicher	84
3.5	Frequenzanalysen	85
3.5.1	Einführung	85
3.5.2	Filterkenngrößen	85
3.5.3	Filterarten	87
3.5.4	Auswahl und Handhabung der Filter	88
3.5.5	Auswertung der Meßergebnisse	91
3.5.6	Fehlermöglichkeiten	92
3.6	Mehrkanalige Signalanalyse	92
3.6.1	Einführung	92
3.6.2	Messung der Übertragungsfunktion	93
3.6.3	Quellenanalyse	94
3.7	Automatische Messung und Auswertung	96
3.7.1	Einführung	96
3.7.2	Meßwertverarbeitung	96
3.7.2.1	Analogrechentechnik	96
3.7.2.2	Digitalrechentechnik	98
3.7.3	Ausgabe der Meßergebnisse	99
3.7.3.1	Pegelschreiber	99
3.7.3.2	XY-Schreiber	100
3.7.3.3	Drucker	100
3.7.4	Funktionsfehler in Meßketten	100
3.8	Schrifttum	101
4	Schwingungen und Schallabstrahlung von festen Körpern	
	von <i>W. Schirmer</i>	102
4.1	Einführung	102
4.2	Biegewellenausbreitung auf Platten	102
4.3	Biegeeigenfrequenzen von Stäben und Platten	109
4.4	Admittanz mechanischer Strukturen	111
4.5	Schallabstrahlung fester Körper	116

4.5.1	Abstrahlgrad, Definition und Grenzwerte	116
4.5.2	Schallabstrahlung konphas schwingender Körper – Monopol- und Dipolstrahler	117
4.5.3	Schallabstrahlung schwach gedämpfter Platten mit Biegeschwingungen	120
4.5.4	Schallabstrahlung stark gedämpfter Platten mit Biegeschwingungen	124
4.6	Modelldarstellungen, Begriffe, Meß- und Berechnungsverfahren zur mechanischen Geräuschenstehung in Maschinen	125
4.7	Geräuscharme Varianten passiver Maschinenstrukturen	128
4.7.1	Bleche mit Dämpfungsbelag	128
4.7.1.1	Zu erwartende Verminderung der Schallabstrahlung	128
4.7.1.2	Einfacher Belag	129
4.7.1.3	Eingezwängter Belag	132
4.7.1.4	Praktische Ausführung von Dämpfungsbelägen	135
4.7.2	Gehäuseformen	136
4.7.3	Zusatzelemente an Krafteinleitungsstellen, Zusatzmassen bei elastischen Verbindungen	138
4.8	Schrifttum	142
5	Luftschalldämmung von E. Lotze	144
5.1	Einführung	144
5.2	Physikalische Grundlagen der Schalldämmung	144
5.2.1	Erläuterung des Begriffes Schalldämmung und Definition des Schalldämm-Maßes	144
5.2.2	Anregung einer Wand zu Biegeschwingungen durch Luftschall	145
5.2.3	Trennimpedanz, Koinzidenzeffekt und Abstrahlwinkel	146
5.2.3.1	Trennimpedanz	146
5.2.3.2	Koinzidenzeffekt	148
5.2.3.3	Abstrahlwinkel	148
5.3	Einschalige ebene Wände	149
5.3.1	Schalldämmung unterhalb der Grenzfrequenz	150
5.3.1.1	Schalldämmung großer bzw. gedämpfter Platten	150
5.3.1.2	Schalldämmung kleiner bzw. ungedämpfter Platten	151
5.3.2	Schalldämmung oberhalb der Grenzfrequenz	155
5.3.3	Zusammenfassung	155
5.4	Spezielle Wandarten	156
5.4.1	Rohrwandungen	156
5.4.2	Doppelwände	159
5.4.2.1	Schallübertragung über die Luftschicht	161
5.4.2.2	Schallübertragung über die gemeinsame Einspannstelle und über starre Verbindungen zwischen den Wandschalen	163
5.4.3	Biegeweiche Vorsatzschalen	165
5.5	Konstruktionen aus mehreren Bauteilen	169
5.5.1	Wände mit Bauteilen unterschiedlicher Schalldämmung	169
5.5.2	Einfluß flankierender Bauteile	169
5.6	Messung des Schalldämm-Maßes	172
5.7	Gemessene Bau-Schalldämm-Maße wichtiger Bauteile und deren Bewertung	174
5.8	Schrifttum	179

6	Luftschallabsorption von E. Lotze	181
6.1	Einführung	181
6.2	Physikalische Grundlagen und Berechnungsverfahren	181
6.2.1	Schallreflexion an Grenzschichten	181
6.2.2	Poröse Absorber ohne Abdeckung	182
6.2.2.1	Kenngrößen poröser Materialien	182
6.2.2.2	Poröse Absorber endlicher Schichtdicke	184
6.2.2.3	Sonderprobleme	188
6.2.3	Poröse Absorber mit vorgeschalteter Masse (Resonanzabsorber)	189
6.3	Ermittlung der Stoffkennwerte für poröses Material	192
6.3.1	Längenbezogener Strömungswiderstand	192
6.3.2	Porosität	194
6.4	Realisierungsprobleme bei porösen Absorbern	195
6.4.1	Gelochte Abdeckung	195
6.4.2	Folienabdeckung	195
6.4.3	Montage mit Wandabstand	197
6.5	Dimensionierung von akustischen Absorbern aus handelsüblichen porösen Materialien	198
6.5.1	Längenbezogener Strömungswiderstand	198
6.5.2	Berechnungsbeispiel	200
6.6	Breitband-Schallabsorber ohne poröses Material	200
6.7	Messung des Schallabsorptionsgrades	203
6.7.1	Hallraummessung	203
6.7.2	Rohrmessung	204
6.7.3	Form von Schallabsorptionsgrad-Angaben	204
6.8	Schrifttum	205
7	Konstruktion lärmarmen Maschinen von W. Schirmer	207
7.1	Einführung	207
7.2	Teil-Geräuschquellen und Gesamtgeräusch einer Maschine	208
7.3	Aufteilung der Geräuschminderung auf Maschinengeräuschanteile	210
7.3.1	Aufteilung auf Teilquellen	210
7.3.2	Aufteilung auf Frequenzbänder	211
7.4	Ansatzpunkte zur Geräuschminderung an Maschinen	213
7.4.1	Maschinenakustische Quellenarten	213
7.4.2	Strömungsmechanische Geräusche	214
7.4.3	Mechanische Geräusche	215
7.4.3.1	Beeinflussung der Körperschallquellen	216
7.4.3.2	Beeinflussung der passiven Maschinenstruktur	218
7.4.4	Aktive Lärmschutzsysteme – „Antischall“	219
7.5	Einbindung in den Konstruktionsprozeß	221
7.6	Schrifttum	222
8	Ventilatorgeräusche von L. Schmidt	224
8.1	Ventilatorbauarten	224
8.2	Ventilator Kennzahlen	225
8.3	Ventilator Kennlinien	226

8.4	Ventilatorbetriebspunkt	226
8.5	Geräuscentstehung	227
8.6	Kennlinie und Geräuschemission	231
8.7	Konstruktive Maßnahmen und Geräuschemission	233
8.8	Einfluß der Einbausituation	233
8.9	Stand der Technik	234
8.10	Ventilator und Schalldämpfer	234
8.11	Schrifttum	235
9	Absorptionsschalldämpfer von W. Frommhold	237
9.1	Einführung	237
9.2	Dämpfungsmechanismus	237
9.3	Kenngrößen	241
9.3.1	Dämpfungsmaße	241
9.3.1.1	Ausbreitungsdämpfung D_a	241
9.3.1.2	Einfügungsdämpfungsmaß D_e	242
9.3.1.3	Durchgangsdämpfungsmaß D_d	242
9.3.2	Kanalquerschnittsformen	243
9.3.3	Normierte Größen	243
9.4	Akustische Bemessung	244
9.4.1	Exakte Lösung für die Ausbreitungsdämpfung	244
9.4.2	Normierte grafische Darstellung (Trapez-Diagramm)	248
9.4.3	Näherungsformel nach <i>Piening</i>	249
9.4.4	Reflexionsdämpfung	252
9.4.5	Einfluß verschiedener Abdeckungen des Absorbermaterials	253
9.4.6	Einfluß der Strömung auf die Schalldämpfung	254
9.4.7	Einfluß der Temperatur auf die Schalldämpfung	255
9.4.8	Unterteilung des Kanalquerschnittes	257
9.4.9	Bedämpfung tiefer Frequenzen	258
9.4.10	Bedämpfung hoher Frequenzen	259
9.5	Schalldämpfer mit Strömung	262
9.5.1	Strömungsgeräusch des Schalldämpfers	262
9.5.2	Druckverlust im Schalldämpfer	263
9.6	Konstruktive Ausführung	264
9.6.1	Verhältnis Kulissenbreite – Spaltweite	264
9.6.2	Absorbermaterial	265
9.6.3	Dämpfungsminderung durch akustische Nebenwege	265
9.6.4	Handelübliche Absorptionsschalldämpfer	266
9.7	Schrifttum	267
10	Schallschutzkapseln von E. Lotze	269
10.1	Einführung	269
10.2	Begriffe und Schallübertragungswege bei einer Maschinenkapsel	269
10.3	Abschätzung der Pegelabsenkung bei Schallübertragung über die Kapselwände – Weg A	271
10.4	Konstruktive Gestaltung	272
10.4.1	Allgemeine Bemerkungen	272
10.4.2	Wahl der Kapselabmessungen	273
10.4.3	Ausführung der Kapselwand	274

10.4.4	Vermeidung der Schallübertragung über Undichtigkeiten und unvermeidbare Öffnungen – Weg B	275
10.4.4.1	Pegelabsenkung bei Schallübertragung über Weg B	275
10.4.4.2	Stoßstellen zwischen den Kapselelementen – Weg B1	277
10.4.4.3	Durchführung von Maschinenteilen – Weg B2	278
10.4.4.4	Stoßstellen zwischen Kapselwänden und angrenzenden Bauteilen – Weg B3	279
10.4.4.5	Öffnungen für die Be- und Entlüftung sowie die Zu- und Abführung von Material oder Werkstücken – Weg B4	280
10.4.5	Vermeidung der Körperschallanregung der Kapsel – Weg C	282
10.4.6	Vermeidung der Schallabstrahlung außerhalb der Kapsel – Weg D	283
10.4.7	Zusammenfassung	283
10.5	Verfahren zum meßtechnischen Nachweis der Einfügungsdämmung	284
10.6	Wärmeabführung aus Schallschutzkapseln	285
10.7	Beispiele praktisch ausgeführter Schallschutzkapseln	288
10.7.1	Baukastensysteme für Schallschutzkapseln	288
10.7.2	Maschinenhaube mit Schallschutzkapselfunktion	288
10.7.3	Integrierte Schallschutzkapsel für eine Schnelläuferpresse	289
10.8	Rechenbeispiel	290
10.8.1	Akustische Dimensionierung	290
10.8.2	Wärmeabführung	291
10.9	Schrifttum	291
11	Schwingungsabwehr bei Maschinenaufstellungen von G. Meltzer	293
11.1	Einführung	293
11.2	Zielstellung der Schwingungsabwehr	293
11.2.1	Schwingungsmodelle technischer Objekte	293
11.2.2	Auswirkung mechanischer Schwingungen	295
11.2.3	Nachweispflicht und Nachweiskategorien	296
11.2.4	Nachweis der Festigkeit von Stützkonstruktionen unter dynamischer Belastung	297
11.2.5	Nachweis der zuverlässigen Funktion von Maschinen und Geräten unter Schwingungseinfluß	299
11.2.6	Beurteilung der Schwingungseinwirkung auf den Menschen am Arbeitsplatz	300
11.3	Verfahren der Schwingungsabwehr bei Maschinenaufstellungen	304
11.3.1	Lösungsweg	304
11.3.2	Schwingungsmodelle für Maschinenaufstellungen	304
11.3.3	Bewegungsgleichungen für das lineare Einmassen- Schwingungssystem mit dem Freiheitsgrad 1	306
11.3.4	Technische Möglichkeiten der Schwingungsabwehr bei stationärer Anregung	308
11.3.5	Schwingungsabwehr bei transients Erregung	309
11.4	Schwingungserregung und Primärmaßnahmen der Schwingungsabwehr	311
11.4.1	Kategorien der Schwingungserregung	311
11.4.2	Dynamik des Kurbeltriebes	312
11.4.3	Massenausgleich	314
11.4.4	Auswuchten	315

11.5	Schwingungsisolierung als Sekundärmaßnahme der Schwingungsabwehr . . .	317
11.5.1	Forderungen an die Schwingungsisolierung	317
11.5.2	Berechnungsgang zur Auslegung der Schwingungsisolierung . . .	318
11.5.3	Berechnungsbeispiel für die Schwingungsisolierung eines Axialventilators	319
11.5.4	Schwingungsisolatoren	321
11.5.5	Beispiele ausgeführter schwingungsisolierter Maschinenaufstellungen	324
11.6	Schwingungstilger	327
11.7	Schrifttum	329
12	Körperschallisolierung von R. Metzger-Thiel	332
12.1	Einführung	332
12.2	Grundlagen der Körperschallisolierung	332
12.2.1	Grundgleichung der Körperschallisolierung	333
12.2.2	Admittanzen des Systems Maschine – Schwingungsisolatoren – Gebäudedecke	337
12.2.2.1	Maschinenadmittanz	337
12.2.2.2	Admittanz der Schwingungsisolatoren	338
12.2.2.3	Admittanz der Gebäudedecken	340
12.2.3	Wirkung eines Zwischenfundamentes	342
12.2.4	Körperschalldämmung in Rohrleitungen	345
12.2.5	Körperschallisolierung von Aggregaten in Maschinenstrukturen . .	346
12.2.6	Regeln für die qualitativ optimierte Körperschallisolierung	347
12.2.7	Schritte zur quantitativen Optimierung der Körperschallisolierung in Gebäuden	348
12.3	Praktische Beispiele für die Körperschallisolierung von Maschinen	350
12.3.1	Aufzugsmaschinen und dazugehörige Schalteinrichtungen	350
12.3.2	Pumpen	352
12.3.3	Lüftungstechnische Anlagen	352
12.4	Schrifttum	353
13	Schallausbreitung und Schallschutz in Arbeitsstätten	
	von S. Gruhl und U.J. Kurze	356
13.1	Einführung	356
13.2	Schallausbreitung im Freifeld	357
13.2.1	Einzel- oder Punktschallquelle	357
13.2.2	Ausgedehnte Schallquellen	359
13.2.3	Verluste und Störungen im Ausbreitungsweg	359
13.3	Schallausbreitung in Räumen	361
13.3.1	Einflüsse und Beschreibungsarten	361
13.3.2	Annähernd kubischer Raum	363
13.3.3	Flachraum	366
13.3.4	Langraum	368
13.3.5	Streukörper	369
13.3.6	Standard-Rechenverfahren	370
13.4	Schallausbreitung durch Koppelflächen	377
13.4.1	Geschlossene Koppelflächen	377
13.4.2	Offene Koppelflächen	379

13.5	Übersicht über Schallschutzmaßnahmen in Räumen	381
13.6	Raumgestaltung und Quellenanordnung	383
13.7	Schallabsorbierende Raumauskleidungen	384
	13.7.1 Anwendung	384
	13.7.2 Anforderungen	385
	13.7.3 Bauformen	386
	13.7.4 Werkstoffe	386
	13.7.5 Wirksamkeit	387
13.8	Schallschirme	389
	13.8.1 Anwendung	389
	13.8.2 Berechnung	390
	13.8.3 Bauformen	394
	13.8.4 Werkstoffe	395
	13.8.5 Wirksamkeit	395
13.9	Trennwände, Kapseln, Kabinen	396
	13.9.1 Anwendung	396
	13.9.2 Akustische Wirkung	396
13.10	Schrifttum	397
	Sachwörterverzeichnis	399