

Werner Schirmer (Hrsg.)

Technischer Lärmschutz

Werner Schirmer (Hrsg.)

Technischer Lärmschutz

Grundlagen und praktische Maßnahmen
zum Schutz vor Lärm und Schwingungen
von Maschinen

2., bearbeitete und erweiterte Auflage

Mit 300 Abbildungen und 40 Tabellen

 Springer

Dr.-Ing. Werner Schirmer
KBI-Schallschutzberatung GmbH
Radeburger Str. 124
01109 Dresden
E-mail: werner.schirmer@kbi-dresden.com

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

ISBN-10 3-540-25507-9 Springer Berlin Heidelberg New York
ISBN-13 978-3-540-25507-9 Springer Berlin Heidelberg New York

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funk- sendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Ver- vielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

Springer ist ein Unternehmen von Springer Science+Business Media
springer.de

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1996, 2006
Printed in Germany

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk be- rechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jeder- mann benutzt werden dürften.

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

Einbandgestaltung: Struve & Partner, Heidelberg
Satz: Fotosatz-Service Köhler GmbH, Würzburg
Herstellung: Reinhold Schöberl, Würzburg

Gedruckt auf säurefreiem Papier 68/3020 – 5 4 3 2 1 0

Vorwort zur zweiten Auflage

Durchsicht, Aktualisierung und Erweiterung für die 2. Auflage erfolgten im Sinne des im Vorwort zur 1. Auflage dargestellten Anliegens und Konzeptes des Buches. Wichtige Erweiterungen sind ein Kapitel zu Adaptronik-Anwendungen im Bereich Schall und Schwingungen bei Maschinen sowie im Kapitel Messtechnik die Mehrkanalmethoden zur Geräuschquellenlokalisierung. Völlig neu gefasst wurde das Kapitel über Vorschriften und Normen für Maschinengeräusche.

Der Herausgeber dankt allen Mitarbeitern an der neuen Auflage für die gute Zusammenarbeit und allen jetzt nicht mehr beteiligten Autoren der 1. Auflage für die Zustimmung zur überarbeiteten Weiterverwendung ihrer Beiträge.

Dresden im Juli 2005

Werner Schirmer

Aus dem Vorwort zur ersten Auflage

Das Buch wendet sich an alle, die sich in Beruf oder Studium in einer der vielen Ingenieurdisziplinen von Maschinenbau bis Bauingenieurwesen, einschließlich Arbeitssicherheit und Umweltschutz, mit technischen Aufgaben des Lärm- und Schwingungsschutzes befassen.

Autoren und Herausgeber verfolgen mit dem Buch die Absicht, diesem Personenkreis anwendungsbereites Wissen über Grundelemente des Schall- und Schwingungsschutzes zu vermitteln:

- Modell und Beeinflussung der Schallentstehung in Maschinen und der Schallausbreitung in ihrer Umgebung,
- physikalischer Hintergrund und Bemessung häufig angewendeter Schall- und Schwingungsschutzelemente,
- Umgang mit Messgeräten und Messwerten,
- Aussagen des Vorschriften-, Normen- und Richtlinienwerkes.

Die Stoffauswahl des Buches ist durch den Aufgabenbereich „Lärm- und Schwingungsschutz an Maschinen, in Arbeitsstätten und deren Umgebung“ geprägt. Der Leser wird jedoch feststellen, dass das Buch wegen der Behandlung von Grundelementen des technischen Lärm- und Schwingungsschutzes auch über diesen Aufgabenbereich hinaus nützlich ist.

Das Buch „Technischer Lärmschutz“ entstand durch umfangreiche Bearbeitung des Buches „Lärmbekämpfung“, das von 1971 bis 1989 in vier Auflagen vom ehemaligen Ostberliner Tribüne-Verlag veröffentlicht wurde. Selbstverständlich wurden dabei auch die angezogenen Vorschriften, Richtlinien und Normen sowie die Auswahl von Schrifttum und Produktbeispielen den aktuellen Bedürfnissen entsprechend geändert.

Da das Vorläufer-Buch schon seit seiner ersten Auflage in ganz Deutschland vermutlich dadurch Anklang gefunden hatte, dass es nach dem Urteil von Fachkollegen Lehr- und Arbeitsbuch vereinte und dabei Theorie unter dem Aspekt praktischer Anwendung vermittelt, wird dessen Darstellungsweise jetzt weitgehend fortgesetzt. Die im ersten Vorwort vom März 1969 gegebene Charakterisierung des Buchkonzeptes, das aus der Lehrtätigkeit der Autoren bei Fortbildungsseminaren entstand, kann deshalb hier wörtlich wiederholt werden:

„Wegen des großen Umfanges der zu behandelnden Fakten musste auf mathematische Herleitung und auf Beweise in der Regel verzichtet werden. Jedoch wird in den meisten Kapiteln bis zur Behandlung von Detailfragen der praktischen Ingenieurarbeit vorgezogen. Vorwiegend Übersichtscharakter hat nur die auf ein Kapitel zusammengedrückte Behandlung der mit der Lärmbekämpfung an Maschinen aufs engste verknüpften Schwingungsabwehr, da andernfalls der Umfang von Lehrgang und Buch leicht auf das Doppelte angewachsen wäre.“

Inhaltsverzeichnis

1	Vorschriften und Normen für Maschinengeräusche	
	<i>U. Trautmann</i>	1
1.1	Einführung	1
1.2	Geräuschemission, Maschinenrichtlinie	1
1.3	Geräuschemission im Freien betriebener Maschinen	3
1.4	Geräuschemission, Umweltzeichen „Blauer Engel“	7
1.5	Geräuschmmission, Arbeitsschutz	8
1.6	Geräuschmmission, baulicher Schallschutz	10
1.7	Geräuschmmission, Nachbarschaftschutz	10
1.8	Schrifttum	11
1.8.1	Literatur	11
1.8.2	Gesetze, EU-Richtlinien	12
1.8.3	Normen, Richtlinien.	12
2	Größen und Messverfahren zur Kennzeichnung von Geräuschen und Geräuschquellen	
	<i>K. Biehn, überarbeitet von U. Trautmann</i>	17
2.1	Einführung	17
2.2	Kennzeichnung der physikalischen Eigenschaften von Geräuschen	17
2.2.1	Schalldruck	17
2.2.2	Schalldruckpegel	18
2.2.3	Bandschalldruckpegel	20
2.3	Größen zur Kennzeichnung der Schallimmission	21
2.3.1	Überblick	21
2.3.2	Bewerteter Schalldruckpegel	22
2.3.3	Äquivalenter Dauerschallpegel, Taktmaximal-Mittelungspegel	23
2.3.4	Beurteilungspegel	24
2.3.5	Spitzen-Schalldruckpegel	25
2.3.6	Einzelereignis-Schalldruckpegel	25
2.3.7	Lärmdosis	25
2.4	Größen zur Kennzeichnung der Schallemission	26
2.4.1	Überblick	26
2.4.2	Schallleistungspegel, Richtwirkungsmaß	26
2.4.3	Schallintensitätspegel	27
2.4.4	Schallenergiepegel	28
2.4.5.1	Schalldruckpegel an festgelegten Messorten	28
2.4.6	Emissions-Schalldruckpegel am Arbeitsplatz	28

2.4.7	Geräuschemissionsangabe	29
2.5	Rechenoperationen mit Schallpegelwerten	30
2.5.1	Addition	30
2.5.2	Subtraktion	32
2.5.3	Mittelwertbildung	32
2.6	Verfahren zur Messung der Schallimmission	33
2.6.1	Vorbemerkungen	33
2.6.2	Vorbereitung der Messung	33
2.6.3	Messdurchführung	33
2.6.4	Messauswertung	34
2.7	Verfahren zur Messung der Schallemission	35
2.7.1	Überblick	35
2.7.2	Freifeldverfahren	38
2.7.2.1	Messprinzip	38
2.7.2.2	Messunsicherheit	40
2.7.3	Hallraumverfahren	43
2.7.3.1	Messprinzip	43
2.7.3.2	Messunsicherheit	43
2.7.4	Vergleichsverfahren	45
2.7.4.1	Messprinzip	45
2.7.4.2	Messunsicherheit	46
2.7.5	Kanalverfahren	47
2.7.5.1	Messprinzip	47
2.7.5.2	Messunsicherheit	47
2.7.6	Intensitätsverfahren	48
2.7.6.1	Messprinzip	48
2.7.6.2	Messunsicherheit	50
2.8	Verfahren zur Nachprüfung angegebener Geräuschemissionswerte	52
2.8.1	Nachprüfverfahren für Einzelmaschinen	52
2.8.2	Nachprüfverfahren für Maschinenlose	52
2.9	Verfahren zur Schallquellenanalyse	55
2.9.1	Überblick	55
2.9.2	Voruntersuchung	55
2.9.3	Verfahren ohne Änderungen an der Maschine	58
2.9.3.1	Schalldruckpegelmessung auf der Messfläche	58
2.9.3.2	Nahfeldmessung	58
2.9.3.3	Körperschallmessung	59
2.9.3.4	Intensitätsmessung	59
2.9.3.5	Frequenzanalyse	60
2.9.4	Verfahren mit Änderungen an der Maschine	60
2.10	Schrifttum	61
3	Messtechnik	
	<i>E. Seidel, überarbeitet von M. Quickert</i>	64
3.1	Einführung	64
3.2	Schalldruckpegelmessung	65
3.2.1	Mikrofone	65
3.2.2	Geräte zur Schalldruckpegel- und Schalldosismessung	67
3.2.3	Aufbau und Funktion des Schallpegelmessers	68

3.2.4	Hilfsmittel	68
3.2.4.1	Kalibriergeräte	68
3.2.4.2	Messschallquellen	70
3.2.4.3	Hilfsmittel zur Verringerung von Störeinflüssen	71
3.2.5	Handhabung der Schallpegelmesser	72
3.2.6	Fehler und Abhilfemaßnahmen	73
3.3	Messung von Schwingungsgrößen	74
3.3.1	Einführung	74
3.3.2	Schwingungs- und Körperschallmessung	74
3.3.2.1	Wandler	75
3.3.2.2	Geräte zur Schwingungsmessung	77
3.3.2.3	Aufbau und Funktion der Schwingungsmessgeräte	77
3.3.2.4	Hilfsmittel	78
3.3.2.5	Handhabung der Schwingungsmessgeräte	79
3.3.2.6	Fehler und Abhilfemaßnahmen	81
3.3.3	Kraftmessung	82
3.3.4	Dehnungsmessung	84
3.4	Speicherung von Messsignalen	85
3.4.1	Einführung	85
3.4.2	Digitale Speicherung	85
3.4.3	Handhabung von Aufzeichnungsgeräten	86
3.4.3.1	Herstellung der Signalaufzeichnung	86
3.4.3.2	Auswertung der Signalaufzeichnung	87
3.4.4	Fehler bei der Zwischenspeicherung	87
3.5	Frequenzanalysen	88
3.5.1	Einführung	88
3.5.2	Filterkenngrößen	88
3.5.3	Filterarten	90
3.5.4	FFT-Analyse	90
3.5.5	Kenngrößen der FFT-Analyse	91
3.5.6	Anwendung von Zeitfenstern	92
3.5.7	Auswahl und Handhabung der Frequenzanalyseverfahren	92
3.5.8	Auswertung der Ergebnisse	95
3.5.9	Cepstrumanalyse	95
3.6	Zweikanalige Signal- und Systemanalyse	97
3.6.1	Einführung	97
3.6.2	Messung der Übertragungsfunktion	97
3.6.3	Quellenanalyse	98
3.7	Mehrkanalmethoden zur Geräuschquellenlokalisierung	100
3.7.1	Einführung	100
3.7.2	Bekanntes Verfahren	101
3.7.3	Kriterien zur Auswahl eines geeigneten Verfahrens	102
3.7.4	Direkte Messverfahren	104
3.7.5	Verfahren mit Berechnungsmodellen	108
3.7.6	Zusammenfassung und Vergleich	112
3.8	Schriftum	112

4	Schwingungen und Schallabstrahlung von festen Körpern	
	<i>W. Schirmer</i>	115
4.1	Einführung	115
4.2	Biegewellenausbreitung auf Platten	115
4.3	Biegeeigenfrequenzen von Stäben und Platten	122
4.4	Admittanz mechanischer Strukturen	125
4.5	Schallabstrahlung fester Körper	130
4.5.1	Abstrahlgrad, Definition und Grenzwerte	130
4.5.2	Schallabstrahlung konphas schwingender Körper – Monopol- und Dipolstrahler	131
4.5.3	Schallabstrahlung schwach gedämpfter Platten mit Biegeschwingungen	134
4.5.4	Schallabstrahlung stark gedämpfter Platten mit Biegeschwingungen ..	138
4.6	Modelldarstellungen, Begriffe, Mess- und Berechnungsverfahren zur mechanischen Geräusentstehung in Maschinen	139
4.7	Geräuscharme Varianten passiver Maschinenstrukturen	142
4.7.1	Bleche mit Dämpfungsbelaag	142
4.7.1.1	Zu erwartende Verminderung der Schallabstrahlung	142
4.7.1.2	Einfacher Belag	144
4.7.1.3	Eingezwängter Belag	145
4.7.1.4	Praktische Ausführung von Dämpfungsbelaagen	150
4.7.2	Gehäuseformen	150
4.7.3	Zusatzelemente an Krafteinleitungsstellen, Zusatzmassen bei elastischen Verbindungen	153
4.8	Schrifttum	156
5	Luftschalldämmung	
	<i>E. Lotze, überarbeitet von W. Schirmer</i>	159
5.1	Einführung	159
5.2	Physikalische Grundlagen der Schalldämmung	159
5.2.1	Erläuterung des Begriffes Schalldämmung und Definition des Schalldämm-Maßes	159
5.2.2	Anregung einer Wand zu Biegeschwingungen durch Luftschall	160
5.2.3	Trennimpedanz, Koinzidenzeffekt und Abstrahlwinkel	162
5.2.3.1	Trennimpedanz	162
5.2.3.2	Koinzidenzeffekt	163
5.2.3.3	Abstrahlwinkel	163
5.3	Einschalige ebene Wände	164
5.3.1	Schalldämmung unterhalb der Grenzfrequenz	165
5.3.1.1	Schalldämmung großer bzw. gedämpfter Platten	165
5.3.1.2	Schalldämmung kleiner bzw. ungedämpfter Platten	167
5.3.2	Schalldämmung oberhalb der Grenzfrequenz	170
5.3.3	Zusammenfassung	170
5.4	Spezielle Wandarten	171
5.4.1	Rohrwandungen	171
5.4.2	Doppelwände	175
5.4.2.1	Schallübertragung über die Luftschicht	176
5.4.2.2	Schallübertragung über die gemeinsame Einspannstelle und über starre Verbindungen zwischen den Wandschalen	179

5.4.3	Biegeweiche Vorsatzschalen	180
5.5	Konstruktionen aus mehreren Bauteilen	184
5.5.1	Wände mit Bauteilen unterschiedlicher Schalldämmung	184
5.5.2	Einfluss flankierender Bauteile	185
5.6	Messung des Schalldämm-Maßes	187
5.7	Schalldämm-Maße von Bauteilen	188
5.8	Schrifttum	189
6	Luftschallabsorption	
	<i>E. Lotze, überarbeitet von W. Schirmer</i>	191
6.1	Einführung	191
6.2	Physikalische Grundlagen und Berechnungsverfahren	191
6.2.1	Schallreflexion an Grenzschichten	191
6.2.2	Poröse Absorber ohne Abdeckung	192
6.2.2.1	Kenngrößen poröser Materialien	192
6.2.2.2	Poröse Absorber endlicher Schichtdicke	194
6.2.2.3	Sonderprobleme	198
6.2.3	Poröse Absorber mit vorgeschalteter Masse (Resonanzabsorber)	199
6.3	Ermittlung der Stoffkennwerte für poröses Material	203
6.3.1	Längenbezogener Strömungswiderstand	203
6.3.2	Porosität	204
6.4	Realisierungsprobleme bei porösen Absorbern	205
6.4.1	Gelochte Abdeckung	205
6.4.2	Folienabdeckung	206
6.4.3	Montage mit Wandabstand	207
6.5	Dimensionierung von akustischen Absorbern aus handelsüblichen porösen Materialien	208
6.5.1	Längenbezogener Strömungswiderstand	208
6.5.2	Berechnungsbeispiel	210
6.6	Breitband-Schallabsorber ohne poröses Material	210
6.7	Messung des Schallabsorptionsgrades	213
6.7.1	Hallraummessung	213
6.7.2	Rohrmessung	214
6.7.3	Form von Schallabsorptionsgrad-Angaben	214
6.8	Schrifttum	216
7	Konstruktion lärmarmer Maschinen	
	<i>W. Schirmer</i>	218
7.1	Einführung	218
7.2	Teil-Geräuschquellen und Gesamtgeräusch einer Maschine	219
7.3	Aufteilung der Geräuschminderung auf Maschinengeräuschanteile	221
7.3.1	Aufteilung auf Teilquellen	221
7.3.2	Aufteilung auf Frequenzbänder	222
7.4	Ansatzpunkte zur Geräuschminderung an Maschinen	224
7.4.1	Maschinenakustische Quellenarten	224
7.4.2	Strömungsmechanische Geräusche	225
7.4.3	Mechanische Geräusche	226

7.4.3.1	Beeinflussung der Körperschallquellen	227
7.4.3.2	Beeinflussung der passiven Maschinenstruktur	229
7.4.4	Aktive Lärmschutzsysteme – „Antischall“	230
7.5	Einbindung in den Konstruktionsprozess	233
7.6	Schrifttum	233
8	Ventilatorgeräusche	
	<i>L. Schmidt</i>	235
8.1	Ventilatorbauarten	235
8.2	Ventilator Kennzahlen	236
8.3	Ventilator Kennlinien	237
8.4	Ventilatorbetriebspunkt	237
8.5	Geräuschenstehung	238
8.6	Kennlinie und Geräuschemission	243
8.7	Konstruktive Maßnahmen und Geräuschemission	244
8.8	Einfluss der Einbausituation	245
8.9	Stand der Technik	246
8.10	Ventilator und Schalldämpfer	246
8.11	Schrifttum	247
9	Absorptionsschalldämpfer	
	<i>W. Frommhold</i>	249
9.1	Einführung	249
9.2	Dämpfungsmechanismus	250
9.3	Kenngößen	253
9.3.1	Dämpfungsmaße	253
9.3.1.1	Ausbreitungsdämpfung D_a	253
9.3.1.2	Einfügungsdämpfungsmaß D_e	254
9.3.1.3	Durchgangsdämpfungsmaß D_d	255
9.3.2	Kanalquerschnittsformen	255
9.3.3	Normierte Größen	255
9.4	Akustische Bemessung	257
9.4.1	Exakte Lösung für die Ausbreitungsdämpfung	257
9.4.2	Normierte grafische Darstellung (Trapez-Diagramm)	260
9.4.3	Näherungsformel nach <i>Piening</i>	262
9.4.4	Reflexionsdämpfung	264
9.4.5	Einfluss verschiedener Abdeckungen des Absorbermaterials	265
9.4.6	Einfluss der Strömung auf die Schalldämpfung	266
9.4.7	Einfluss der Temperatur auf die Schalldämpfung	268
9.4.8	Unterteilung des Kanalquerschnittes	269
9.4.9	Bedämpfung tiefer Frequenzen	270
9.4.10	Bedämpfung hoher Frequenzen	271
9.5	Schalldämpfer mit Strömung	274
9.5.1	Strömungsgeräusch des Schalldämpfers	274
9.5.2	Druckverlust im Schalldämpfer	275
9.6	Konstruktive Ausführung	276
9.6.1	Verhältnis Kulissenbreite – Spaltweite	276
9.6.2	Absorbermaterial	277

9.6.3	Dämpfungsminderung durch akustische Nebenwege	277
9.6.4	Handelsübliche Absorptionsschalldämpfer	278
9.7	Schrifttum	280
10	Schallschutzkapseln	
	<i>E. Lotze, überarbeitet von W. Schirmer</i>	281
10.1	Einführung	281
10.2	Begriffe und Schallübertragungswege bei einer Maschinenkapsel	281
10.3	Abschätzung der Pegelabsenkung bei Schallübertragung über die Kapselwände – Weg A	283
10.4	Konstruktive Gestaltung	285
10.4.1	Allgemeine Bemerkungen	285
10.4.2	Wahl der Kapselabmessungen	285
10.4.3	Ausführung der Kapselwand	286
10.4.4	Vermeidung der Schallübertragung über Undichtigkeiten unvermeid- bare Öffnungen – Weg B	287
10.4.4.1	Pegelabsenkung bei Schallübertragung über Weg B	287
10.4.4.2	Stoßstellen zwischen den Kapselementen – Weg B1	290
10.4.4.3	Durchführung von Maschinenteilen – Weg B2	290
10.4.4.4	Stoßstellen zwischen Kapselwänden und angrenzenden Bauteilen – Weg B3	292
10.4.4.5	Öffnungen für die Be- und Entlüftung sowie die Zu- und Abführung von Material oder Werkstücken – Weg B4	292
10.4.5	Vermeidung der Körperschallanregung der Kapsel – Weg C	295
10.4.6	Vermeidung der Schallabstrahlung außerhalb der Kapsel – Weg D	296
10.4.7	Zusammenfassung	296
10.5	Verfahren zum meßtechnischen Nachweis der Einfügungsdämmung	296
10.6	Wärmeabführung aus Schallschutzkapseln	297
10.7	Beispiele praktisch ausgeführter Schallschutzkapseln	300
10.7.1	Baukastensysteme für Schallschutzkapseln	300
10.7.2	Maschinenhaube mit Schallschutzkapselfunktion	301
10.7.3	Integrierte Schallschutzkapsel für eine Schnellläuferpresse	301
10.8	Rechenbeispiel	303
10.8.1	Akustische Dimensionierung	303
10.8.2	Wärmeabführung	304
10.9	Schrifttum	305
11	Schwingungsabwehr bei Maschinenaufstellungen	
	<i>G. Meltzer</i>	306
11.1	Einführung	306
11.2	Notwendigkeit und Zielsetzung der Schwingungsabwehr	306
11.2.1	Auswirkung mechanischer Schwingungen	306
11.2.2	Rechtliche Vorschriften	307
11.2.3	Normative und Richtwerte	308
11.2.3.1	Nachweis der Festigkeit von Baukonstruktionen unter dynamischer Belastung.	308
11.2.3.2	Nachweis der zuverlässigen Funktion von Maschinen und Geräten unter Schwingungseinwirkung	310
11.2.3.3	Beurteilung der Schwingungseinwirkung auf den Menschen.	312

11.3	Verfahren zur Schwingungsabwehr	315
11.3.1	Schwingungssysteme und Schwingungsmodelle	315
11.3.2	Verfahrensgruppen	318
11.3.2.1	Mathematische Beschreibung eines Schwingungssystems	318
11.3.2.2	Dynamische und kinematische Anregung	320
11.3.2.3	Primärmaßnahmen und Sekundärmaßnahmen	321
11.3.2.4	Quelle – Ausbreitungsweg – Empfänger	322
11.3.2.5	Passive und aktive Schwingungsabwehr	322
11.3.2.6	Spürbare Schwingungen und Körperschall	322
11.3.2.7	Projektzustand und ausgeführte Anlage	322
11.3.3	Schwingungserregung	323
11.3.3.1	Erregungsarten	323
11.3.3.2	Entstehung freier Massenkräfte	323
11.3.4	Primärmaßnahmen der Schwingungsabwehr	326
11.3.4.1	Massenausgleich	326
11.3.4.2	Auswuchten	327
11.3.5	Schwingungsisolierung	329
11.3.5.1	Zielstellung und konstruktive Realisierung	329
11.3.5.2	Isolierwirkungsgrad	331
11.3.5.3	Zweistufige Schwingungsisolierung	331
11.3.5.4	Schwingungsisolatoren und Dämpfer	332
11.3.6	Stoßisolierung	337
11.3.7	Aktiver Schwingungsschutz durch Ausregelung	338
11.3.8	Schwingungstilger	340
11.3.9	Verminderung von Verkehrs- und Industrieerschütterungen	342
11.4	Berechnungsverfahren zur Schwingungsisolierung	345
11.4.1	Zusammenstellung der Berechnungsziele	345
11.4.2	Orientierungsrechnung mit 1 Freiheitsgrad	346
11.4.2.1	Berechnungsgang	346
11.4.2.2	Berechnungsbeispiel	347
11.4.3	Genauere Berechnung	349
11.4.3.1	Räumliche Schwingungen des Einmassensystems (Freiheitsgrad 6)	349
11.4.3.2	Zweistufige Schwingungsisolierung (bis Freiheitsgrad 12)	349
11.4.3.3	Berücksichtigung der Nachgiebigkeit des Aufstellortes	350
11.5	Ausgeführte Beispiele	350
11.6	Schrifttum	353
12	Körperschallisolierung	
	<i>R. Melzig-Thiel, überarbeitet von M. Bockhoff.</i>	356
12.1	Einführung	356
12.2	Grundlagen der Körperschallisolierung	356
12.2.1	Grundgleichung der Körperschallisolierung	357
12.2.2	Admittanzen des Systems Maschine – Schwingungsisolatoren – Gebäudedecke	362
12.2.2.1	Maschinenadmittanz	362
12.2.2.2	Admittanz der Schwingungsisolatoren	363
12.2.2.3	Admittanz der Gebäudedecken	366
12.2.3	Wirkung eines Zwischenfundamentes	367
12.2.4	Körperschalldämmung in Rohrleitungen	371

12.2.5	Körperschallisolierung von Aggregaten in Maschinenstrukturen	372
12.2.6	Regeln für die qualitativ optimierte Körperschallisolierung	373
12.2.7	Schritte zur quantitativen Optimierung der Körperschallisolierung in Gebäuden	375
12.3	Praktische Beispiele für die Körperschallisolierung von Maschinen . . .	376
12.3.1	Aufzugsmaschinen und dazugehörige Schalteinrichtungen	376
12.3.2	Pumpen	378
12.3.3	Lüftungstechnische Anlagen	379
12.4	Schrifttum	379
13	Schallausbreitung und Schallschutz in Räumen	
	<i>S. Gruhl und U.J. Kurze</i>	382
13.1	Einführung	382
13.2	Schallausbreitung im Freifeld	383
13.2.1	Einzel- oder Punktschallquelle	383
13.2.2	Ausgedehnte Schallquellen	385
13.2.3	Verluste und Störungen im Ausbreitungsweg	386
13.3	Schallausbreitung in geschlossenen Räumen	387
13.3.1	Einflüsse und Beschreibungsarten	387
13.3.2	Annähernd kubischer Raum	389
13.3.3	Flachraum	392
13.3.4	Langraum	394
13.3.5	Streukörper	395
13.3.6	Standard-Rechenverfahren	396
13.4	Schallausbreitung durch Koppelflächen	403
13.4.1	Geschlossene Koppelflächen	403
13.4.2	Offene Koppelflächen	405
13.5	Übersicht über Schallschutzmaßnahmen in Räumen	407
13.6	Raumgestaltung und Quellenanordnung	410
13.7	Schallabsorbierende Raumauskleidungen	411
13.7.1	Anwendung	411
13.7.2	Anforderungen	411
13.7.3	Bauformen	412
13.7.4	Werkstoffe	413
13.7.5	Wirksamkeit	413
13.8	Schallschirme	416
13.8.1	Anwendung	416
13.8.2	Berechnung	416
13.8.3	Bauformen	420
13.8.4	Werkstoffe	421
13.8.5	Wirksamkeit	421
13.9	Trennwände, Kapseln, Kabinen	422
13.9.1	Anwendung	422
13.9.2	Akustische Wirkung	423
13.10	Schrifttum	423

14	Adaptronik-Anwendungen	
	<i>W.-G. Drossel</i>	426
14.1	Einführung	426
14.2	Aktive Werkstoffe	428
14.3	Systementwurf	432
14.4	Systemtechnik	433
14.5	Anwendungsbeispiel	434
14.5.1	Strukturkontrolle	435
14.5.2	Schwingungsdämpfung	437
14.5.3	Schwingungstilgung	438
14.5.4	Schwingungsisolaton	441
14.6	Schrifttum	443
	Sachverzeichnis	445

Mitarbeiterverzeichnis

Bockhoff, Michael, Dr. rer. nat., Centre Technique des Industries Mécaniques, Senlis, F

Drossel, Welf-Guntram, Dr.-Ing., Fraunhofer Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik, Chemnitz und Dresden

Frommhold, Werner, Prof. Dr.-Ing., Fachhochschule Lübeck, Professur für Technische Akustik

Gruhl, Siegbert, Dr.-Ing., Müller-BBM, Dresden

Kurze, Ulrich, Dr.-Ing., Müller-BBM, München

Meltzer, Gottfried, Prof. Dr.-Ing. habil., Technische Universität Dresden, Professur für Technische Diagnostik

Quickert, Martin, Dipl.-Ing., Fraunhofer Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik, Chemnitz und Dresden

Schirmer, Werner, Dr.-Ing., KÖTTER Beratende Ingenieure, Dresden

Schmidt, Lothar, Dipl.-Ing., Lommatzsch/Sa.

Trautmann, Uwe, Dr.-Ing. ABIT Ingenieure Dr. Trautmann, Teltow b. Berlin

Hinweis für den Leser

1. Die Angaben über Normen, Vorschriften und Richtlinien (Stand 2005) entbinden den Leser nicht davon, sich über die jeweils gültigen Fassungen oder Neuerscheinungen zu informieren.
2. Die Nennung von Erzeugnissen als Beispiele stellt kein Werturteil über genannte und nicht genannte Erzeugnisse dar. Die Hersteller oder Lieferer sind nicht an die hier genannten Eigenschaften gebunden.
3. Alle Nummerierungen (Bilder, Tabellen, Gleichungen, Schrifttum) beginnen in jedem Hauptabschnitt neu. Bei Verweisungen auf andere Abschnitte wird, soweit erforderlich, die dortige Hauptabschnittsnummer hinzugefügt.
4. Das Schrifttum ist in jedem Hauptabschnitt eigenständig verzeichnet, so dass Doppelnennungen auftreten.

Wichtige Formelzeichen und Einheiten

Formelzeichen	Einheit	Benennung, Bemerkungen ¹⁾
A	m^2	äquivalente Schallabsorptionsfläche (13.3.2)
a	m/s^2	Beschleunigung, Schwingbeschleunigung
B	$\text{N} \cdot \text{m}^2$	Biegesteifigkeit des Stabes (4.3)
B'	$\text{N} \cdot \text{m}$	Biegesteifigkeit der Platte (4.3)
B	$V/[x]$	Übertragungsfaktor von Meßwandlern für die Größe x (3.2.1, 3.3.2.1, 3.3.3)
c	m/s	Schallgeschwindigkeit, ohne Index: in Luft, Index B für Biege- wellen, Index L für Longitudinalwellen (4.2)
c	N/m	Federsteifigkeit, Federkonstante (4.4, 11.3.1)
D	dB	Schalldruckpegeldifferenz, Maß für die Kanaldämpfung (9.3.1)
D	m^4/s	Dipolmoment (4.5.2)
D_{I}	dB	Richtwirkungsmaß (2.4.2)
d	m	Plattendicke
E	N/m^2	Elastizitätsmodul
F	N	Kraft
f	Hz	Frequenz, Index g für Biegewellengrenzfrequenz (4.2)
G	N/m^2	Schubmodul (4.7.1.3)
h	s/kg	(mechanische) Admittanz, $\underline{h} = \underline{\nu}/E$, Index T für Transferadmit- tanz (4.4)
h	m	halbe Kanalbreite (9.3.3), Raumhöhe (13.3.3)
I	$\text{N} \cdot \text{s}$	Impuls (7.5.3)
J	W/m^2	Schallintensität (2.4.3)
k	m^{-1}	Wellenzahl, $k = 2\pi/\lambda = \omega/c$, Index B für Biege- wellen (4.2)
k	$\text{N} \cdot \text{s/m}$	Dämpfungskonstante des Einmassen-Schwingungssystems (11.3.1)
L	dB	Schalldruckpegel (2.2.2)
L_{J}	dB	Schallintensitätspegel (2.4.3)
L_{W}	dB	Schallleistungspegel (2.4.2)
L_{WF}	dB	Strukturübertragungsmaß (kraftbezogener Schallleistungspe- gel) (4.6)
M	kg/m^2	flächenbezogene Masse von Platten

¹⁾ In Klammern wird die Nummer des Abschnittes angegeben, der die Definition der jeweiligen Größe enthält.

Formel- zeichen	Einheit	Benennung, Bemerkungen ¹⁾
M	$\text{N} \cdot \text{m}$	Moment
m	kg	Masse
m'	kg/m	längenbezogene Masse von Stäben
m	m^{-1}	Energiedämpfungskoeffizient von Luft (13.3.2)
n	min^{-1}	Drehzahl
n	m/N	Nachgiebigkeit (12.2.2)
P	W	Leistung, Luftschalleistung (2.4.2), Körperschalleistung (4.2), Wärmestrom (9.6)
p	Pa	Schalldruck, Luftdruck (2.2.1)
q	m^3/s	Schallfluss (4.5.2)
q	1	Öffnungsanteil von Kapseln (10.4.4.1), Streukörperdichte (13.3.5)
q_v	1	Geräuschanteil (7.2)
R	dB	Schalldämm-Maß (5.1)
R	1	Schallreflexionsfaktor (6.2.1)
r	m	Abstand zwischen Immissionsort und Quelle (13.2.1)
S	m^2	Fläche
s'	N/m^3	flächenbezogene dynamische Steifigkeit (5.4.2.1)
T	s	Periodendauer, Integrationszeit (2.2.1), Nachhallzeit (13.3.2)
t	s	Zeit
t	$^{\circ}\text{C}$	Temperatur
Δt	K	Temperaturdifferenz $1 \text{ K} \hat{=} 1 ^{\circ}\text{C}$
V	m^3	Volumen
\dot{V}	m^3/s	Volumenstrom
v	m/s	Geschwindigkeit, Schwinggeschwindigkeit, Schallschnelle
Z	$\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^3$	spezifische Impedanz, $Z = p/v$ (6.2.1)
z	m	Schirmwert (13.8.2)
α	1	Schallabsorptionsgrad (6.2.1)
$\bar{\alpha}$	1	mittlerer Schallabsorptionsgrad eines Raumes (13.3.2)
Γ^2	1	Richtwirkungsfaktor (13.2.1)
γ'	m^{-1}	Schallausbreitungskoeffizient, $\gamma' = \alpha' + j \beta'$, $\beta' = k$
ε	1	Anpassungsverhältnis (6.2.2.2, 9.3.3)
η	1	Verlustfaktor (4.2), Frequenzparameter (9.3.3.3)
\varkappa	1	Stoßzahl (11.3.6)
Λ	1	normierte Auskleidungstiefe (9.3.3)
λ	m	Wellenlänge, ohne Index: in Luft, Index B für Biegewellen- länge
μ	1	Poissonsche Querkontraktionszahl
Ξ	$\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^4$	längenbezogener Strömungswiderstand (6.2.2.1)
ξ	m	Schallausschlag, Schwingweg
ϱ	kg/m^3	Dichte
ϱ	1	Reflexionsgrad (13.3.3)
σ	1	Abstrahlgrad (4.5), Porosität (6.2.2.1)
τ	1	Transmissionsgrad (5.1)
τ	s	Impulsdauer, Stoßdauer (7.4.3.1)
φ	$^{\circ}$	Phasenwinkel

Formelzeichen	Einheit	Benennung, Bemerkungen ¹⁾
χ	1	Strukturfaktor (6.2.2.1)
Ω	sr	Raumwinkel (13.2.1)
ω	s ⁻¹	Winkel­frequenz (Kreisfrequenz), $\omega = 2 \pi f$

Schreibweisen für zeitabhängige Größen

p Augenblickswert $p(t)$

\hat{p} Amplitude, Spitzenwert

\tilde{p} Effektivwert (quadratischer Mittelwert), s. Gl. (2.1),

\bar{v} zeitlicher und räumlicher quadratischer Mittelwert, z. B. Gl. (4.5)

$$p(t) = \hat{p} \cos(\omega t + \varphi) = \operatorname{Re} \{ \underline{p} e^{j\omega t} \}$$

mit

$\underline{p} e^{j\omega t}$ rotierender komplexer Zeiger,

$\bar{p} = \hat{p} e^{j\varphi}$ ruhender komplexer Zeiger;

$$\underline{Z} = \underline{p}/\underline{v} = \operatorname{Re} \{ \underline{Z} \} + j \operatorname{Im} \{ \underline{Z} \} = Z^{\perp} + j Z^{\perp} = |\underline{Z}| e^{j\varphi}$$

Kurzformen: $|\underline{Z}| = Z$, im Abschnitt 4.7.1 $Z^{\perp} = Z$.