

Inhaltsverzeichnis

1	Vorschriften und Normen für Maschinengeräusche	1
	Uwe Trautmann	
1.1	Einführung	1
1.2	Geräuschemission, Maschinenrichtlinie	2
1.3	Geräuschemission, im Freien betriebene Maschinen	6
1.4	Geräuschemission, Umweltzeichen „Blauer Engel“	9
1.5	Geräuschemission, Ökodesign-Richtlinie	10
1.6	Geräuschimmission, Arbeitsschutz	10
1.7	Geräuschimmission, baulicher Schallschutz	13
1.8	Geräuschimmission, Nachbarschaftsschutz	13
	Gesetze, EU-Richtlinien	14
	Normen, Richtlinien	15
	Literatur	20
2	Größen und Messverfahren zur Kennzeichnung von Geräuschen und Geräuschquellen	23
	Detlef Schulz	
2.1	Einführung	23
2.2	Kennzeichnung der physikalischen Eigenschaften von Geräuschen	24
2.2.1	Schalldruck und Schallschnelle	24
2.2.2	Schalldruckpegel	26
2.2.3	Bandschalldruckpegel	26
2.3	Rechenoperationen mit Schallpegelwerten	28
2.3.1	Addition	28
2.3.2	Subtraktion	30
2.3.3	Mittelwertbildung	31
2.4	Größen zur Kennzeichnung der Schallimmission	31
2.4.1	Überblick	31
2.4.2	Bewerteter Schalldruckpegel	32
2.4.3	Äquivalenter Dauerschallpegel, Taktmaximal- Mittelungspegel	34

2.4.4	Beurteilungspegel	35
2.4.5	Spitzen-Schalldruckpegel	36
2.4.6	Schallexpositionspegel	37
2.4.7	Lärmdosis	37
2.5	Psychoakustische Kenngrößen	38
2.5.1	Überblick und psychoakustische Grundlagen	38
2.5.2	Lautheit	40
2.5.3	Schärfe	43
2.5.4	Tonalität, Tonhaltigkeit, Klanghaftigkeit	44
2.5.5	Modulation und Schwankungsstärke	45
2.5.6	Rauhigkeit	45
2.5.7	Impulshaltigkeit	46
2.6	Größen zur Kennzeichnung der Schallemission	46
2.6.1	Überblick	46
2.6.2	Schallleistungspegel, Richtwirkungsmaß	47
2.6.3	Schallintensität, Schallintensitätspegel	48
2.6.4	Schallenergiepegel	49
2.6.5	Schalldruckpegel an festgelegten Messorten	50
2.6.6	Emissions-Schalldruckpegel am Arbeitsplatz	50
2.6.7	Geräuschemissionsangaben	51
2.7	Verfahren zur Messung der Schallimmission	53
2.7.1	Vorbemerkungen	53
2.7.2	Vorbereitung der Messung	53
2.7.3	Messdurchführung	54
2.7.4	Messauswertung	55
2.8	Verfahren zur Messung der Schallemission, Schallleistungsmessung	56
2.8.1	Überblick	56
2.8.2	Freifeldverfahren	60
2.8.3	Hallraumverfahren	65
2.8.4	Vergleichsverfahren	69
2.8.5	Kanalverfahren	71
2.8.6	Intensitätsverfahren	73
2.9	Verfahren zur Nachprüfung angegebener Geräuschemissionswerte	77
2.9.1	Nachprüfverfahren für Einzelmaschinen	77
2.9.2	Nachprüfverfahren für Maschinenlose	77
2.10	Verfahren zur Schallquellenanalyse	81
2.10.1	Überblick	81
2.10.2	Voruntersuchung	81
2.10.3	Verfahren ohne Änderung an der Maschine	84
2.10.4	Verfahren mit Änderung an der Maschine	87
	Literatur	88

3	Messtechnik	93
	Jörn Hübel	
3.1	Einführung	93
3.2	Luftschall	94
3.2.1	Schalldruckpegelmessung	94
3.2.2	Messung der Luftschallschnelle mittels Hitzdraht-Anemometer	106
3.2.3	Messschallquellen	107
3.3	Körperschall- und Schwingungsgrößen	108
3.3.1	Einführung	108
3.3.2	Beschleunigungsaufnehmer	110
3.3.3	Messung der Schwingschnelle	119
3.3.4	Kraftaufnehmer	120
3.3.5	Punkt-Admittanz oder -Impedanz-Messköpfe	121
3.3.6	Dehnungsmessstreifen	122
3.3.7	Quellen zur Schwingungsanregung	123
3.4	Frequenzanalysen	125
3.4.1	Einführung	125
3.4.2	Analog/Digital-Wandler	125
3.4.3	Diskrete Fouriertransformation	130
3.4.4	Bandfilteranalyse	141
3.4.5	Auswahl und Handhabung der Frequenzanalyseverfahren	144
3.4.6	Sonogramm oder Campbell-Diagramm und Ordnungsanalyse	145
3.4.7	Cepstrum-Analyse	147
3.5	Zweikanalige Signal- und Systemanalyse	148
3.5.1	Einführung	148
3.5.2	Messung der Übertragungsfunktion	148
3.5.3	Anregung der Systeme	150
3.5.4	Quellenanalyse	151
	Literatur	153
4	Ausbreitung und Abstrahlung von Körperschall	155
	Jörn Hübel	
4.1	Einführung	155
4.2	Biegewellenausbreitung auf Platten	156
4.3	Biegeeigenfrequenzen von Stäben und Platten	165
4.4	Admittanz mechanischer Strukturen	169
4.5	Schallabstrahlung fester Körper	175
4.5.1	Abstrahlgrad, Definition und Grenzwerte	175
4.5.2	Schallabstrahlung konphas schwingender Körper – Monopol und Dipolstrahler	176

4.5.3	Schallabstrahlung schwach gedämpfter Platten mit Biegeschwingungen	180
4.5.4	Schallabstrahlung stark gedämpfter Platten mit Biegeschwingungen	183
4.6	Modelldarstellungen, Begriffe, Mess- und Berechnungsverfahren zur mechanischen Geräusentstehung in Maschinen.	185
4.7	Geräuscharme Varianten passiver Maschinenstrukturen	190
4.7.1	Bleche mit Dämpfungsbelag	190
4.7.2	Gehäuseformen	199
4.7.3	Zusatzelemente an Krafteinleitungsstellen, Zusatzmassen bei elastischen Verbindungen.	202
	Literatur.	207
5	Luftschalldämmung	211
	Werner Schirmer und Jörn Hübelt	
5.1	Einführung	211
5.2	Physikalische Grundlagen der Schalldämmung.	212
5.2.1	Erläuterung des Begriffes Schalldämmung und Definition des Schalldämm-Maßes	212
5.2.2	Anregung einer Wand zu Biegeschwingungen durch Luftschall	213
5.2.3	Trennimpedanz, Koinzidenzeffekt und Abstrahlwinkel.	214
5.3	Einschalige ebene Wände	218
5.3.1	Schalldämmung unterhalb der Grenzfrequenz.	218
5.3.2	Schalldämmung oberhalb der Grenzfrequenz	224
5.3.3	Zusammenfassung	225
5.4	Spezielle Wandarten.	226
5.4.1	Rohrwandungen	226
5.4.2	Doppelwände	231
5.5	Konstruktion aus mehreren Bauteilen	242
5.6	Messung des Schalldämm-Maßes	243
5.7	Schalldämm-Maße von Bauteilen	245
	Literatur.	246
6	Luftschallabsorption	249
	Jörn Hübelt	
6.1	Einführung	249
6.2	Physikalische Grundlagen und Berechnungsverfahren	250
6.3	Poröse Absorber.	252
6.3.1	Kenngrößen poröser Materialien	252
6.3.2	Poröse Absorber endlicher Schichtdicke	258
6.3.3	Poröse Absorberschicht mit Wandabstand	262

6.3.4	Zusätzliche Verluste durch Bewegung des Absorber-Skelettes	267
6.3.5	Absorberabdeckungen	267
6.3.6	Dimensionierung von akustischen Absorbern aus handelsüblichen porösen Materialien.	275
6.4	Resonanzabsorber	277
6.4.1	Plattenresonator	279
6.4.2	Helmholtz-Resonator und Lochplattenresonatoren	285
6.4.3	Fazit	288
6.5	Weitere Breitband-Schallabsorber	288
6.5.1	Material- und Strömungs-Grenzschichtreibung.	288
6.5.2	Poröses Material.	291
6.6	Ermittlung der Stoffkennwerte für poröses Material	292
6.6.1	Längenbezogener Strömungswiderstand Ξ	292
6.6.2	Porosität Φ	294
6.6.3	Strukturfaktor.	298
6.6.4	Absorberkennwerte	298
6.7	Messung des Schallabsorptionsgrades.	300
6.7.1	Messung im Hallraum	300
6.7.2	Messung im Impedanzrohr.	301
6.7.3	Messung in-situ	303
6.7.4	Form von Schallabsorptionsgrad-Angaben	306
	Literatur.	308
7	Schallausbreitung und Schallschutz in Räumen	313
	Jörn Hübelt und Wolfgang Probst	
7.1	Einführung	313
7.2	Schallausbreitung im Freifeld	315
7.2.1	Einzel- oder Punktschallquelle.	315
7.2.2	Ausgedehnte Schallquellen	318
7.2.3	Verluste und Störungen im Ausbreitungsweg	319
7.3	Schallausbreitung in geschlossenen Räumen.	321
7.3.1	Einflüsse und Beschreibungsarten	321
7.3.2	Annähernd kubischer Raum.	323
7.3.3	Flachraum.	327
7.3.4	Langraum	330
7.3.5	Streukörper.	331
7.4	Schallausbreitung durch Koppelflächen.	332
7.4.1	Geschlossene Koppelflächen	332
7.4.2	Offene Koppelflächen	335
7.5	Raumgestaltung und Quellenanordnung	337
7.6	Schallabsorbierende Raumauskleidungen	338

7.6.1	Anwendung	338
7.6.2	Anforderungen	339
7.6.3	Bauformen	340
7.6.4	Werkstoffe	341
7.6.5	Wirksamkeit	341
7.7	Schallschirme	345
7.7.1	Anwendung	345
7.7.2	Berechnung	346
7.7.3	Bauformen	353
7.7.4	Werkstoffe	354
7.7.5	Wirksamkeit	354
7.8	Trennwände, Kapseln, Kabinen	355
7.8.1	Anwendung	355
7.8.2	Wirksamkeit	355
7.9	In Software implementierbare Verfahren	357
7.9.1	Berechnung der Schallausbreitung in Arbeitsräumen nach VDI 3760	357
7.9.2	Erweitertes Spiegelquellenverfahren mit Strahlverfolgung und Schirmrechnung	361
7.9.3	Stochastisches Schallstrahl- oder -teilchenverfahren	363
7.9.4	Maschinen und andere technische Geräte als Schallquellen	367
7.9.5	Planung schalltechnisch optimierter Arbeitsstätten	369
	Literatur	377
8	Ventilatorgeräusche	381
	Thomas Carolus	
8.1	Ventilatorbauarten	382
8.2	Aufgabe des Ventilators und Ventilator Kennzahlen	382
8.3	Auswahl des Ventilators	385
8.4	Geräuschqualität und empfundene Lästigkeit	390
8.5	Mechanismen der Schallentstehung bei Ventilatoren	394
8.6	Konstruktive Geräuschminderungsmaßnahmen bei Ventilatoren	396
8.7	Niederfrequente Schall- und Schwingungsphänomene in lufttechnischen Anlagen	402
	Literatur	404
9	Schalldämpfer	407
	Jörn Hübelt und Mirko Ruhнау	
9.1	Einführung	407
9.2	Wirkmechanismen	408
9.3	Dämpfungsmaße	414

9.3.1	Längs- D_{pr} und Ausbreitungsdämpfungsmaß D_a	414
9.3.2	Einfügungsdämpfungsmaß D_i	415
9.3.3	Durchgangsdämpfungsmaß D_t	416
9.3.4	Einordnung der Maße.	416
9.4	Absorptionsschalldämpfer	418
9.4.1	Kanalquerschnittsformen	418
9.4.2	Normierte Größen	419
9.4.3	Akustische Bemessung	420
9.4.4	Konstruktive Ausführung	441
9.5	Minderung durch Reflexion	444
9.5.1	Berechnung – Theorie der linearen Netzwerke	444
9.5.2	$\lambda/4$ -Resonanzschalldämpfer.	448
9.5.3	Querschnittsprung	450
9.5.4	Kammer-Schalldämpfer	453
9.5.5	Lochbleche und perforierte Rohre	462
9.6	Strömungsgeräusche	464
9.6.1	Verminderung von Geräuschen an Pneumatikventilen und Druckluftdüsen	464
9.6.2	Strömungsgeräusch des Schalldämpfers	465
9.6.3	Druckverlust im Schalldämpfer	468
	Literatur.	470
10	Schallschutzkapseln	473
	Werner Schirmer	
10.1	Einführung	473
10.2	Begriffe und Schallübertragungswege bei einer Maschinenkapsel	474
10.3	Abschätzung der Pegelabsenkung bei Schallübertragung über die Kapselwände – Weg A	476
10.4	Konstruktive Gestaltung.	477
10.4.1	Allgemeine Bemerkungen	477
10.4.2	Wahl der Kapselabmessungen	478
10.4.3	Ausführung der Kapselwand	479
10.4.4	Vermeidung der Schallübertragung über Undichtigkeiten und unvermeidbare Öffnungen – Weg B	480
10.4.5	Vermeidung der Körperschallanregung der Kapsel – Weg C	489
10.4.6	Vermeidung der Schallabstrahlung außerhalb der Kapsel – Weg D	491
10.4.7	Zusammenfassung	491
10.5	Verfahren zum messtechnischen Nachweis der Einfügungsdämmung	491

10.6	Wärmeabführung aus Schallschutzkapseln	492
10.7	Beispiele praktisch ausgeführter Schallschutzkapseln.	497
10.7.1	Baukastensysteme für Schallschutzkapseln.	497
10.7.2	Maschinenhaube mit Schallschutzkapselfunktion.	497
10.7.3	Integrierte Schallschutzkapsel für eine Schnellläuferpresse	498
10.8	Rechenbeispiel.	499
10.8.1	Akustische Dimensionierung.	499
10.8.2	Wärmeabführung.	501
	Schrifttum	501
11	Schwingungsabwehr bei Maschinenaufstellungen.	503
	Michael Beitelschmidt	
11.1	Einführung	503
11.2	Notwendigkeit und Zielstellung der Schwingungsabwehr	504
11.2.1	Auswirkung mechanischer Schwingungen	504
11.2.2	Rechtliche Vorschriften	505
11.2.3	Normative und Richtwerte.	506
11.3	Verfahren zur Schwingungsabwehr.	514
11.3.1	Schwingungssysteme und Schwingungsmodelle.	514
11.3.2	Mathematische Beschreibung des Schwingungsmodells für einen Freiheitsgrad	519
11.3.3	Begriffe der Schwingungstechnik	528
11.3.4	Schwingungserregung	530
11.3.5	Primärmaßnahmen der Schwingungsabwehr.	535
11.3.6	Schwingungsisolierung	540
11.3.7	Stoßisolierung	549
11.3.8	Aktiver Schwingungsschutz durch Ausregelung	551
11.3.9	Schwingungstilger	552
11.3.10	Verminderung von Verkehrs- und Industrieerschütterungen	555
11.4	Berechnungsverfahren zur Schwingungsisolierung.	559
11.4.1	Zusammenstellung der Berechnungsziele	559
11.4.2	Orientierungsrechnung mit 1 Freiheitsgrad	560
11.4.3	Numerische Verfahren für Mehrfreiheitsgradsysteme	564
11.5	Ausgeführte Beispiele	566
	Literatur.	571
12	Körperschallisolierung.	575
	Jan Troge	
12.1	Einführung	575
12.2	Grundlagen und Grundgleichung der Körperschallisolierung.	576

12.2.1	Modell für die Beschreibung von Körperschall an Lagerstellen	578
12.2.2	Dynamische Eigenschaften des Systems Maschine – Schwingungsisolatoren – Gebäudedecke	589
12.3	Maßnahmen zur Körperschallisolierung von Aggregaten	598
12.3.1	Körperschallisolierung von Aggregaten in Gebäuden	598
12.3.2	Körperschallisolierung von Aggregaten in Maschinenstrukturen	605
12.3.3	Zusammenfassende Regeln für die qualitativ optimierte Körperschall-isolierung	608
12.4	Praktische Beispiele für die Körperschallisolierung von Maschinen	609
12.4.1	Aufzugsmaschinen und dazugehörige Schalteinrichtungen	609
12.4.2	Pumpen	611
12.4.3	Lüftungstechnische Anlagen	613
	Literatur	614
13	Adaptronik-Anwendungen	617
	Welf-Guntram Drossel	
13.1	Einführung	617
13.2	Aktive Werkstoffe	620
13.3	Systementwurf	625
13.4	Systemtechnik	626
13.5	Anwendungsbeispiele	628
13.5.1	Strukturkontrolle	628
13.5.2	Schwingungsdämpfung	630
13.5.3	Schwingungskompensation	631
	Schrifttum	637
	Stichwortverzeichnis	639