

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Grundlegende maschinenakustische Begriffe</b>	<b>1</b>
1.1	Allgemeines	1
1.2	Direkte und indirekte Schallabstrahlung	3
1.3	Pegelrechnung	4
1.4	Grundzüge der physiologischen Akustik	9
1.5	Admittanz und Impedanz	12
1.6	Berechnungen mit komplexen Zahlen	14
1.7	Effektivwerte	17
<b>2</b>	<b>Frequenzanalyse von Zeitsignalen</b>	<b>21</b>
2.1	Frequenzanalyse harmonischer Zeitsignale	21
2.2	Fourier-Reihen periodischer Zeitsignale	23
2.3	Fourier-Transformation	27
2.4	Diskrete Fourier-Transformation	31
2.5	Eigenschaften der Fourier-Transformation	33
<b>3</b>	<b>Dämpfung von Körperschall</b>	<b>37</b>
3.1	Physikalische Dämpfungsmechanismen	37
3.2	Das Kelvin-Voigt-Modell	40
3.2.1	Einfaches, eindimensionales Kelvin-Voigt-Modell	40
3.2.2	Verallgemeinerung für kontinuierliche Körper	44
3.3	Dämpfende Beläge	46
3.3.1	Platte mit dämpfendem Belag	46
3.3.2	Eingezwängte Beläge	48
<b>4</b>	<b>Das Körperschallverhalten einfacher Strukturen</b>	<b>55</b>
4.1	Der Einmasseschwinger	56
4.1.1	Freie Schwingungen des Einmasseschwingers	57
4.1.2	Erzwungene Schwingungen des Einmasseschwingers	61
4.2	Biegeschwingungen von Rechteckplatten	65
4.2.1	Freie Schwingungen der gedämpften Platte	70
4.2.2	Erzwungene Schwingungen der gedämpften Platte	77
4.3	Das Körperschallmaß	79
4.3.1	Das Körperschallmaß einer Rechteckplatte	81
4.4	Abschätzverfahren für das Körperschallmaß	83
4.4.1	Glatte Rechteckplatte	83
4.4.2	Ähnlichkeitsgesetze für das Körperschallmaß	87
4.4.3	Platte mit vorgeschalteter Punktmasse	92
4.5	Auswirkung von Rippen auf das Körperschallmaß	94

---

<b>5</b>	<b>Abstrahlung von Luftschallwellen</b>	<b>99</b>
5.1	Luftschallwellen	99
5.2	Der Abstrahlgrad	100
5.3	Der Kugelstrahler	102
5.4	Die Kolbenmembran	105
5.5	Die Abstrahlung rechteckiger Platten	107
5.5.1	Physikalische Betrachtungen zur Abstrahlung von Platten	107
5.5.2	Berechnung des Abstrahlgrads rechteckiger Platten	110
5.5.3	Ähnlichkeitsgesetze für die Abstrahlung von Platten	115
<b>6</b>	<b>Abkopplung von Körperschall</b>	<b>123</b>
6.1	Maschinendynamisches Modell der Abkopplung	124
6.2	Maschinenakustisches Modell der Abkopplung	125
<b>7</b>	<b>Maschinenakustische Grundgleichung</b>	<b>131</b>
<b>8</b>	<b>Finite Elemente für die Berechnung von Körperschallfeldern</b>	<b>135</b>
8.1	Grundlagen der Finiten Elemente	135
8.2	Das Verfahren der Numerischen Modalanalyse	145
8.3	Ein Beispiel für eine FEM-Berechnung	150
<b>9</b>	<b>Numerische Berechnung abgestrahlter Luftschallfelder</b>	<b>153</b>
9.1	Grundlagen des äußeren Abstrahlproblems	153
9.2	Akustische Finite Elemente Methode für endliche Außengebiete	156
9.3	Infinite ellipsoidale Elemente nach Burnett	159
9.4	Randelemente	168
9.5	Vergleich von Methoden zur Berechnung von Abstrahlproblemen	174
<b>10</b>	<b>Grundlagen der maschinenakustischen Meßtechnik</b>	<b>179</b>
10.1	Zielsetzungen maschinenakustischer Messungen	179
10.2	Maschinenakustisch relevante Meßgrößen	179
10.3	Die allgemeine maschinenakustische Meßkette	182
10.4	Sensoren	183
10.4.1	Luftschallsensoren	184
10.4.2	Körperschallsensoren	191
10.4.3	Kraftsensoren	207
10.4.4	Drucksensoren	209
10.4.5	Drehwinkelsensoren für Drehzahlen und Drehschwingungen	211
10.4.6	Schnittstellenstandards für Sensoren	211
10.5	Meßdatenerfassung	214
10.5.1	Grundlagen der Filtertechnik	214

10.5.2	Funktionsweise von Frequenzanalytoren . . . . .	219
10.5.3	Praktische Aspekte der Diskreten Fourier-Transformation (DFT) . . . . .	224
10.5.4	Meßfunktionen der Fourier-Transformation . . . . .	230
10.6	Fehlerursachen maschinenakustischer Messungen . . . . .	238
<b>11</b>	<b>Meß- und Auswerteverfahren</b>	<b>241</b>
11.1	Schwingungsanregung technischer Strukturen . . . . .	243
11.1.1	Anregungssignale . . . . .	243
11.2	Geräte für die Schwingungsanregung . . . . .	249
11.2.1	Impulsanregungsgeräte . . . . .	249
11.2.2	Elektromagnetische Schwingerreger . . . . .	253
11.2.3	Elektrohydraulische Schwingerreger . . . . .	256
11.3	Ordnungsanalyse . . . . .	258
11.3.1	Zeitbasierte Frequenzanalyse . . . . .	258
11.3.2	Drehwinkelbasierte Frequenzanalyse mit variabler Abtastfrequenz . . . . .	260
11.3.3	Drehwinkelbasierte Frequenzanalyse mit konstanter Abtastfrequenz . . . . .	262
11.3.4	Weitere Analyseverfahren . . . . .	262
11.4	Experimentelle Modalanalyse . . . . .	268
11.4.1	Auswahl des Meßobjekts . . . . .	270
11.4.2	Festlegung der Randbedingungen für die Lagerung . . . . .	270
11.4.3	Diskretisierung des Meßobjektes . . . . .	270
11.4.4	Wahl der Anregungspunkte und Ausführung der Messungen . . . . .	273
11.4.5	Modellbildung . . . . .	275
11.4.6	Parameterschätzung . . . . .	278
11.4.7	Darstellung der Ergebnisse . . . . .	281
11.4.8	Vergleich der Experimentellen und der Numerischen Modalanalyse . . . . .	283
11.5	Betriebsschwingformanalyse . . . . .	286
11.5.1	Betriebsschwingformanalyse im Zeitbereich . . . . .	287
11.5.2	Betriebsschwingformanalyse im Frequenz- bzw. Ordnungsbereich . . . . .	287
11.6	Meßmethoden für die Luftschalleistung . . . . .	288
11.6.1	Grundlagen der Messung von Luftschall . . . . .	289
11.6.2	Schalldruckverfahren . . . . .	293
11.6.3	Schallintensitätsverfahren . . . . .	298
<b>12</b>	<b>Methoden für die Entwicklung lärmarmer Maschinen</b>	<b>307</b>
12.1	Einführung . . . . .	307
12.2	Anforderungen an konstruktive Maßnahmen zur Lärminderung . . . . .	308

12.3	Werkzeuge für die Entwicklung lärmarmen Maschinen . . . . .	309
12.4	Methodisches Vorgehen beim Ableiten und Umsetzen von Maßnahmen zur Lärminderung . . . . .	313
12.5	Allgemeine Maßnahmen für die Lärminderung von Maschinen . . . . .	317
12.6	Regeln für die Minderung von Schall . . . . .	319
12.6.1	Beeinflussung der Erregerkräfte . . . . .	319
12.6.2	Beeinflussung des Körperschallmaßes . . . . .	321
12.6.3	Beeinflussung des Abstrahlgrades . . . . .	323
<b>13</b>	<b>Ableitung von Maßnahmen zur Minderung von Geräuschen</b>	<b>327</b>
13.1	Anforderungen an konstruktive Maßnahmen zur Minderung von Geräuschen . . . . .	328
13.2	Schallentstehungskette . . . . .	329
13.3	Reduktion der Schallanregung . . . . .	330
13.3.1	Körperschallquellen . . . . .	330
13.3.2	Flüssigkeitschallquellen . . . . .	333
13.3.3	Luftschallquellen . . . . .	334
13.4	Reduktion der Schallübertragung . . . . .	335
13.4.1	Schalldämmung und Schalldämpfung . . . . .	335
13.4.2	Eigenschwingungsverhalten der Übertragungselemente . .	336
13.5	Reduktion der Schallabstrahlung . . . . .	338
13.6	Ein einfaches, systematisches Beispiel . . . . .	338
13.6.1	Untersuchte Varianten . . . . .	339
13.6.2	Ergebnisse der durchgeführten Schalleistungsberechnungen . . . . .	341
13.7	Typische Anregungs- und Resonanzfrequenzen . . . . .	349
	<b>Literatur</b>	<b>353</b>
	<b>Sachverzeichnis</b>	<b>357</b>