

Akustik

Eine Einführung

von Dr. rer. nat., Dr.-Ing. E.h. Heinrich Kuttruff,
em. Professor für Technische Akustik
an der Rheinisch-Westfälischen
Technischen Hochschule Aachen



Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung

- 1.1 Was ist Schall? 1
- 1.2 Was ist Akustik? 4

2 Einige Begriffe aus der Schwingungslehre

- 2.1 Einige Beispiele von Schwingungen 7
- 2.2 Komplexe Darstellung harmonischer Schwingungen 11
- 2.3 Schwebungen 12
- 2.4 Erzwungene Schwingungen, Impedanz 12
- 2.5 Resonanz 14
- 2.6 Freie Schwingungen eines einfachen Resonanzsystems 17
- 2.7 Elektromechanische Analogien 18
- 2.8 Leistung 21
- 2.9 Fourieranalyse 22
 - 2.9.1 Periodische Signale 22
 - 2.9.2 Nichtperiodische Signale 25
 - 2.9.3 Stationäre Signale 27
 - 2.9.4 Zur Durchführung der Fourieranalyse 27
- 2.10 Übertragungsfunktion und Impulsantwort 28
- 2.11 Nichtlineare Systeme 31

3 Die akustischen Grundgleichungen

- 3.1 Schallfeldgrößen 33
- 3.2 Die akustischen Grundgleichungen für Fluide 36
- 3.3 Spannungs-Dehnungsbeziehungen des isotropen Festkörpers 38
- 3.4 Wellengleichungen 40
- 3.5 Intensität und Energiedichte von Schallwellen in Fluiden 42
- 3.6 Der Schalldruckpegel 44

4 Ebene Wellen

- 4.1 Lösung der Wellengleichung 46
- 4.2 Harmonische Wellen 49
- 4.3 Zur Schallgeschwindigkeit 51
- 4.4 Ausbreitungsdämpfung 52
 - 4.4.1 Dämpfung in Gasen 54
 - 4.4.2 Dämpfung in Flüssigkeiten 59

VIII

| | | |
|----------|---|-----|
| 4.4.3 | Dämpfung in Festkörpern | 60 |
| 4.5 | Nichtlineare Schallausbreitung | 62 |
| 5 | Kugelwelle und Schallabstrahlung | |
| 5.1 | Lösung der Wellengleichung | 66 |
| 5.2 | Die Punktschallquelle | 67 |
| 5.3 | Der Dopplereffekt | 70 |
| 5.4 | Richtfunktion und Strahlungswiderstand | 72 |
| 5.5 | Der Dipol | 75 |
| 5.6 | Die lineare Strahlerzeile | 77 |
| 5.7 | Der Kugelstrahler (atmende Kugel) | 80 |
| 5.8 | Die Kolbenmembran | 82 |
| 5.8.1 | Schalldruck auf der Strahlermittellachse | 83 |
| 5.8.2 | Schalldruck im Fernfeld | 84 |
| 5.8.3 | Strahlungsleistung und Bündelungsgrad | 87 |
| 6 | Reflexion und Brechung | |
| 6.1 | Reflexions- und Brechungsgesetz | 90 |
| 6.2 | Schallausbreitung in der Atmosphäre | 92 |
| 6.3 | Reflexionsfaktor und Wandimpedanz | 94 |
| 6.4 | Absorptionsgrad | 98 |
| 6.5 | Stehende Wellen | 100 |
| 6.6 | Schallabsorption von Wänden und Wandverkleidungen | 102 |
| 6.6.1 | Wandimpedanz eines Luftpolsters | 103 |
| 6.6.2 | Impedanz und Absorption einer porösen Schicht auf schallharter Wand | 104 |
| 6.6.3 | Absorption einer sehr dünnen, porösen Schicht | 107 |
| 6.6.4 | Unporöse, schwingungsfähige Schichten | 110 |
| 7 | Beugung und Streuung | |
| 7.1 | Exakte Formulierung von Streuproblemen | 115 |
| 7.2 | Beugung an der schallharten Kugel | 116 |
| 7.3 | Schalldurchgang durch Öffnungen | 119 |
| 7.3.1 | Das Kirchhoffsche Beugungsintegral | 119 |
| 7.3.2 | Schalldurchgang durch große Öffnungen | 120 |
| 7.3.3 | Schalldurchgang durch kleine Öffnungen in einer schallharten Wand | 121 |
| 7.3.4 | Beugung an der Halbebene | 123 |
| 7.4 | Das Babinetsche Prinzip | 127 |
| 7.5 | Streuung an vielen Streukörpern, Vielfachstreuung | 128 |
| 8 | Akustische Leitungen | |
| 8.1 | Rohrdämpfung | 132 |
| 8.2 | Die Leitungsgleichungen | 134 |

| | | |
|-------|---|-----|
| 8.3 | Leitungen mit unstetigen Querschnittsänderungen | 136 |
| 8.3.1 | Rohrverengung ($S_2 < S_1$), Lochplatte | 139 |
| 8.3.2 | Rohrerweiterung ($S_2 > S_1$) | 140 |
| 8.3.3 | Resonator | 141 |
| 8.3.4 | Akustisches Tiefpassfilter | 142 |
| 8.4 | Akustische Leitungen mit stetigen Querschnittsänderungen (Trichter) | 143 |
| 8.4.1 | Konischer Trichter (Kegeltrichter) | 144 |
| 8.4.2 | Exponentialtrichter | 145 |
| 8.5 | Höhere Wellentypen | 148 |
| 8.6 | Dispersion | 155 |

9 Schallfelder in geschlossenen Hohlräumen

| | | |
|-----|--|-----|
| 9.1 | Eigenschwingungen in eindimensionalen Wellenleitern (Rohren) | 158 |
| 9.2 | Eigenschwingungen des Rechteckraums mit schallharten Wänden | 161 |
| 9.3 | Eigenschwingungen zylindrischer und kugelförmiger Hohlräume | 165 |
| 9.4 | Erzwungene Schwingungen im eindimensionalen Wellenleiter | 166 |
| 9.5 | Erzwungene Schwingungen in beliebigen Hohlräumen | 170 |
| 9.6 | Freie Hohlraumsschwingungen | 173 |
| 9.7 | Statistische Eigenschaften der Übertragungsfunktion | 176 |

10 Schallwellen im isotropen Festkörper

| | | |
|--------|---|-----|
| 10.1 | Schallwellen im unbegrenzten Festkörper | 180 |
| 10.2 | Reflexion und Brechung; Rayleighwelle | 185 |
| 10.3 | Wellen in Platten und Stäben | 188 |
| 10.3.1 | Dehnung und Biegung | 189 |
| 10.3.2 | Dehnwellen | 191 |
| 10.3.3 | Biegewellen | 194 |
| 10.3.4 | Schallabstrahlung von einer schwingenden Platte | 196 |
| 10.3.5 | Berücksichtigung von Verlusten | 198 |

11 Musik und Sprache

| | | |
|--------|--|-----|
| 11.1 | Ton, Klang, Geräusch | 201 |
| 11.2 | Tonhöhe, Tonintervalle und Tonskalen | 203 |
| 11.3 | Zur Wirkungsweise von Musikinstrumenten | 206 |
| 11.4 | Saiteninstrumente | 207 |
| 11.4.1 | Streichinstrumente | 207 |
| 11.4.2 | Instrumente mit angezupften oder angeschlagenen Saiten | 211 |
| 11.5 | Blasinstrumente | 214 |
| 11.5.1 | Blasinstrumente mit Lippenpfeifen | 215 |
| 11.5.2 | Blasinstrumente mit Zungenpfeifen | 216 |
| 11.5.3 | Blechblasinstrumente | 218 |
| 11.6 | Erzeugung von Sprache | 219 |
| 11.6.1 | Der Kehlkopf | 220 |

X

- 11.6.2 Der Stimmkanal, Vokale 221
- 11.6.3 Bildung von Konsonanten 223

12 Das menschliche Gehör

- 12.1 Aufbau und Wirkungsweise des Hörorgans 226
- 12.2 Psychoakustische Tonhöhe 231
- 12.3 Hörschwelle und Hörfläche 235
- 12.4 Lautstärke und Lautheit, Frequenzgruppen 237
- 12.5 Verdeckung 241
- 12.6 Messung der Lautstärke bzw. der Lautheit 243
- 12.7 Richtungswahrnehmung 245

13 Raumakustik

- 13.1 Geometrische Raumakustik 251
- 13.2 Impulsantwort eines Raumes 254
- 13.3 Diffuses Schallfeld 257
- 13.4 Stationäre Energiedichte und Nachhall 261
- 13.5 Schallabsorption 264
- 13.6 Zur Hörsamkeit von Auditorien 270
- 13.7 Akustische Messräume 273

14 Bauakustik

- 14.1 Kennzeichnung und Messung der Luftschalldämmung 276
- 14.2 Luftschalldämmung von zusammengesetzten Bauteilen 279
- 14.3 Luftschalldämmung einer unbegrenzten Wand 281
- 14.4 Luftschalldämmung einer Doppelwand 288
- 14.5 Körperschalldämmung 292
 - 14.5.1 Trittschallpegel und Trittschalldämmung 293
 - 14.5.2 Verbesserung des Trittschallschutzes 295
 - 14.5.3 Körperschallausbreitung im Bauwerk 296

15 Grundzüge der Lärmbekämpfung

- 15.1 Grenzwerte und Richtlinien 300
- 15.2 Grundvorgänge der Lärmentstehung 302
 - 15.2.1 Schlaggeräusche 302
 - 15.2.2 Strömungsgeräusche 302
 - 15.2.3 Stoßwellen 305
- 15.3 Primäre Lärmbekämpfung 307
- 15.4 Sekundäre Lärmbekämpfung 311
 - 15.4.1 Kapselung von Lärmquellen 311
 - 15.4.2 Verhinderung der Körperschalleinleitung 312
 - 15.4.3 Lärmschutzwände 313

- 15.4.4 Abschirmung durch Bewuchs 316
- 15.4.5 Absenkung des Lärmpegels durch raumakustische Maßnahmen 316
- 15.4.6 Reflexionsschalldämpfer 317
- 15.4.7 Absorptionsschalldämpfer 319
- 15.5 Persönlicher Schallschutz 321

16 Wasserschall und Ultraschall

- 16.1 Ortung mit Wasserschall (Sonartechnik) 324
- 16.2 Zur Schallausbreitung in Meerwasser 325
- 16.3 Kennzeichnung der Echostärke 328
- 16.4 Störungen 329
- 16.5 Ausrüstung 331
- 16.6 Allgemeine Bemerkungen zum Ultraschall 333
- 16.7 Erzeugung und Nachweis bzw. Empfang von Ultraschall 334
- 16.8 Diagnostische Ultraschallanwendungen 336
 - 16.8.1 Materialprüfung 337
 - 16.8.2 Medizinische Diagnostik (Sonografie) 338
- 16.9 Anwendungen von Leistungsultraschall 340
 - 16.9.1 Kavitation 340
 - 16.9.2 Ultraschallreinigung 340
 - 16.9.3 Verbindungstechnik 341
 - 16.9.4 Bohren und Schneiden 343
- 16.10 Erzeugung hoher und höchster Ultraschallfrequenzen 343

17 Elektroakustische Wandler

- 17.1 Piezoelektrischer Wandler 351
- 17.2 Elektrostatischer Wandler (Kondensatorwandler) 355
- 17.3 Dynamischer Wandler 358
- 17.4 Magnetischer Wandler 361
- 17.5 Magnetostruktionswandler 363
- 17.6 Der Kopplungsfaktor 364
- 17.7 Vierpolgleichungen und Reziprozitätsbeziehungen 367

18 Mikrofone

- 18.1 Grundsätzliches zur Arbeitsweise von Luftschallmikrofonen 369
- 18.2 Kondensatormikrofon 372
- 18.3 Piezoelektrische Mikrofone 376
- 18.4 Dynamische Mikrofone 378
- 18.5 Kohlemikrofon 380
- 18.6 Richtmikrofone 381
- 18.7 Hydrofone 384
- 18.8 Schwingungsempfänger 386
- 18.9 Kalibrierung von Mikrofonen 388

XII

19 Lautsprecher und andere elektroakustische Schallquellen

- 19.1 Dynamischer Lautsprecher 392
- 19.2 Elektrostatischer oder Kondensatorlautsprecher 396
- 19.3 Magnetischer Lautsprecher 398
- 19.4 Zur Verbesserung der Schallabstrahlung von Lautsprechern 399
 - 19.4.1 Die Lautsprecherbox 399
 - 19.4.2 Die Bassreflexbox 401
 - 19.4.3 Trichterlautsprecher 402
- 19.5 Richtlautsprecher 404
- 19.6 Kopfhörer 406
- 19.7 Schallsender für Wasser- und Ultraschall 408

20 Elektroakustische Schallübertragung

- 20.1 Stereophonie 414
 - 20.1.1 Konventionelle Stereophonie 415
 - 20.1.2 Kunstkopfstereophonie 417
 - 20.1.3 Kompensation des Übersprechens 419
- 20.2 Schallspeicherung 420
 - 20.2.1 Schallplatte 420
 - 20.2.2 Tonfilm 423
 - 20.2.3 Magnetische Schallaufzeichnung 427
- 20.3 Beschallungsanlagen 430
 - 20.3.1 Auslegung von Beschallungsanlagen 431
 - 20.3.2 Zur räumlichen Anordnung der Lautsprecher 432
 - 20.3.3 Akustische Rückkopplung 435

Verzeichnis der verwendeten Symbole 438

Weiterführende Literatur 441

Sachregister 443