

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

Inhaltsverzeichnis

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 Strahlermittelachse	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 Kirchhoff sehe 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 Babinet'sche 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 Hohlraumschwingungen	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

- 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 Doppel wand 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 Leistungultraschall 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 Elektrostatistischer 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

Inhaltsverzeichnis

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