

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

S. Hirzel Verlag Stuttgart · Leipzig



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

- 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 Babinettsche 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	Rohrweiterung ($S_2 > S_1$)	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 Hohlräumschwingungen	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 Hörfäche 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	Magnetostriktionswandler	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

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 Stereofonie 414
 - 20.1.1 Konventionelle Stereofonie 415
 - 20.1.2 Kunstkopfstereofonie 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