

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
2	Schall in Gasen und Flüssigkeiten	7
2.1	Grundgrößen und Pegelmaße	7
2.2	Theoretische Grundlagen der Hydrodynamik	11
2.3	Akustische Grundgleichungen und Lösungen	12
2.3.1	Akustische Grundgleichungen	12
2.3.2	Wellengleichung	17
2.3.3	Integralgleichung	19
2.4	Schall in unbegrenzten Medien	22
2.4.1	Lösungen der Wellengleichung	22
2.4.2	Ebene Wellen	26
2.4.3	Kugelwelle	33
2.5	Schallabsorption	35
2.5.1	Schalldämpfung durch innere Reibung	35
2.5.2	Schalldämpfung durch Wärmeleitung	38
2.5.3	Molekulare Absorption	44
2.5.4	Schallausbreitung im porösen Medium	50
3	Reflexion, Brechung, Beugung von Schall	55
3.1	Reflexion bei senkrechtem Schalleinfall	55
3.2	Schalldurchgang durch ein geschichtetes Medium bei senkrechtem Schalleinfall	60
3.3	Reflexion, Transmission und Schallbrechung bei schrägem Schalleinfall	64
3.4	Schallbrechung bei Schallausbreitung im Freien	68
3.4.1	Temperatureinfluss	68
3.4.2	Windeinfluss	69
3.5	Schallbeugung	70

VIII Inhaltsverzeichnis

4 Nichtlineare Wellenausbreitung in Gasen und Flüssigkeiten	77
4.1 Grundgleichungen für den nichtlinearen Fall	77
4.2 Aufteilung von Wellen bei hohen Intensitäten	79
4.3 Unterschiedliche nichtlineare Wellengleichungen	84
4.3.1 Kuznetsovsche Wellengleichung	85
4.3.2 Westervelt-Gleichung	85
4.3.3 Burgers-Gleichung	86
4.3.4 KZK-Gleichung	86
4.3.5 Übersicht Nichtlinearer Wellengleichungen	88
4.4 Akustische Strömung (Acoustic Streaming)	88
4.5 Kavitation	90
5 Akustische Wellen in festen Körpern	93
5.1 Grundbegriffe und Definitionen	93
5.1.1 Mechanische Verschiebungen und Verzerrungen	93
5.1.2 Mechanische Spannungen in festen Körpern	98
5.1.3 Stoffgesetz	101
5.2 Herleitung der Wellengleichung	105
5.2.1 1D-Wellengleichung	105
5.2.2 3D-Wellengleichung	108
5.3 Wellen in allseitig unbegrenzten Festkörpern:	
Longitudinal- und Transversal-Wellen	110
5.3.1 Longitudinal-Welle (Dichte-Welle bzw. Dilatations-Welle)	110
5.3.2 Transversal-Wellen (Schub- bzw. Scherwellen)	112
5.4 Wellen in einseitig begrenzten festen Körpern:	
Oberflächen-Wellen (Rayleigh-Wellen)	115
5.4.1 Wellen in begrenzten festen Körpern	115
5.4.2 Oberflächen-Wellen	115
5.5 Wellen in begrenzten festen Körpern:	
Dehn-Wellen und Biege-Wellen in Platten	119
5.5.1 Kirchhoffssche Plattentheorie	120
5.5.2 Plattenschwingungen - Biegewellen in dünnen Platten .	124
5.5.3 Biegewellen in Platten und ihre Schallabstrahlung .	126
5.5.4 Dehnwellen in Platten	131
6 Schallquellen, Schallabstrahlung	133
6.1 Kolbenstrahler im Rohr	133
6.2 Trichterstrahler	134
6.3 Kugelstrahler	138
6.4 Punktstrahler	139
6.5 Dipolstrahler	141
6.6 Lineare Strahlergruppe	145
6.7 Kolbenstrahler in ebener Wand	148
6.7.1 Strahlungsimpedanz	149

6.7.2	Das Schallfeld auf der Mittelsenkrechten	154
6.7.3	Fernfeld	156
6.7.4	Nahfeldlänge (Natürlicher Fokus)	160
6.8	Saiten und Membranen, Luftschwingungen in Rohren	161
6.8.1	Transversale Schwingungen der Saite	161
6.8.2	Transversale freie Schwingungen von Membranen	172
6.8.3	Axiale Luftschwingungen in offenen zylindrischen Rohren	180
6.9	Dispersion bei akustischen Wellen	186
7	Physiologische und psychologische Akustik	189
7.1	Das Gehör	189
7.2	Schallempfindung, Lautstärke	194
7.3	Frequenzgruppen	198
7.4	Auflösungsvermögen des Gehörs	199
7.5	Psychoakustische Erscheinungen	204
7.5.1	Residuum	204
7.5.2	Verdeckung	204
7.6	Zweiohriges Hören	206
7.7	Das Stimmorgan	207
8	Raumakustik	215
8.1	Einführung	215
8.2	Wellentheoretische Raumakustik	216
8.2.1	Eigenfrequenzen des Quaderraumes	216
8.2.2	Eigenresonanzen des Zylinderraums	221
8.3	Statistische Raumakustik	226
8.3.1	Raumfrequenzkurve	226
8.3.2	Nachhall	227
8.3.3	Stationäre Energiedichte	232
8.3.4	Schallabsorption der Wände	233
8.3.5	Einflussgrößen der akustischen Qualität von Auditorien	238
9	Bauakustik	241
9.1	Definitionen zur Luftschalldämmung	242
9.2	Einschalige Wände, Massegesetz und Biegewellenanregung	244
9.3	Zweischalige Wände	248
9.4	Körperschalldämmung	250
9.5	Ausbreitung von Körperschall in Gebäuden	253
10	Lärm	255
10.1	Lärmquellen	257
10.1.1	Lärmentstehung durch Strömung und Stoßwellen	258
10.1.2	Verkehrslärmquellen	262

10.1.3	Lärm am Arbeitsplatz	264
10.1.4	Geräusche im Wohnbereich	265
10.2	Lärmbekämpfungsmaßnahmen	266
10.2.1	Lärmschutzverordnungen und -empfehlungen	266
10.2.2	Primäre Lärmbekämpfungsmaßnahmen	269
10.2.3	Sekundäre Lärmbekämpfungsmaßnahmen	270
10.2.4	Aktive Lärmbekämpfung	274
10.3	Subjektive Lärmreaktionen	275
10.3.1	Lärmschwerhörigkeit	276
10.3.2	Andere organische Lärmschäden	278
10.3.3	Störungen der Sprachkommunikation und Leistungsstörungen	278
10.3.4	Schlafstörungen	279
10.3.5	Belästigung	279
11	Elektromechanische Analogien	281
11.1	Passive elektrische und mechanische Bauelemente	281
11.2	Elektromechanische Analogie 1. und 2. Art	284
11.3	Mechanische Resonanzkreise	286
11.3.1	Mechanischer Parallelresonanzkreis	286
11.3.2	Mechanischer Serienresonanzkreis (Reihenschwingkreis)	288
11.4	Die akustischen Grundelemente	290
11.4.1	Akustisches Masselement	290
11.4.2	Akustisches Federelement	291
11.4.3	Akustisches Dämpfungselement (Reibungselement) ..	292
11.5	Akustische Grundschatungen	293
11.5.1	Tonraum	293
11.5.2	Helmholtz-Resonator	294
11.5.3	Praktische Anwendungsbeispiele von akustischen Grundschatungen	295
11.5.4	Helmholtz-Resonatoren im Künstlichen Ohr	297
11.5.5	Akustische Siebketten (Akustische Tiefpass-Filter) ..	299
11.5.6	Elektrodynamischer Lautsprecher in einer Lautsprecherbox	305
11.6	Mason-Modell zur Beschreibung von Ultraschallwandlern ..	308
11.6.1	Die Simulation der Ultraschall-Wandlerkette	309
11.6.2	Berechnungsverfahren	314
11.6.3	Sendewandler	316
11.6.4	Empfangswandler	318
11.6.5	Ergebnisse	319

12 Grundlagen der elektroakustischen Wandler	329
12.1 Einführung	331
12.1.1 Empfindlichkeit	332
12.1.2 Reziprozitätsbeziehungen, Schottky'sches Tiefenempfangsgesetz	333
12.2 Elektrostatische Wandler	336
12.3 Piezoelektrische Wandler	338
12.3.1 Piezoelektrische Zustands- und Wandlergleichungen	339
12.3.2 Piezoelektrische Materialien	343
12.4 Elektrodynamische Wandler	347
12.5 Elektromagnetische Wandler	348
12.6 Magnetostriktive Wandler	350
13 Mikrofone	353
13.1 Kondensatormikrofone	354
13.1.1 Empfindlichkeit der Kondensatormikrofone in Niederfrequenzschaltung	356
13.1.2 Konventionelle Kondensatormikrofone	356
13.1.3 Elektretmikrofone	358
13.1.4 Kondensatormikrofone in Hochfrequenzschaltung	361
13.2 Piezoelektrische Mikrofone	361
13.3 Dynamische Mikrofone	365
13.4 Optische Mikrofone	367
13.5 Siliziummikrofone	369
13.5.1 Verfahren der Siliziumtechnologie für die akustische Sensorik	369
13.5.2 Silizium-Kondensatormikrofone	372
13.5.3 Piezoelektrische und andere Siliziummikrofone	374
13.6 Richtmikrofone	376
13.6.1 Bündelungsgrad, Bündelungsmaß	377
13.6.2 Gradientenmikrofone	378
13.6.3 Interferenzmikrofone	386
13.7 Mikrofonkalibrierung	389
13.7.1 Mikrofon-Übertragungsfaktoren	389
13.7.2 Methoden mit bekannten Schallfeldern	391
13.7.3 Reziprozitätsverfahren	393
13.7.4 Elektrostatische Ersatzkraft oder Eichgitter	396
14 Schallsender	399
14.1 Die Abstrahlung von Schall durch eine Kolbenmembran	400
14.1.1 Kolbenmembran in unendlich großer Schallwand	402
14.1.2 Richtwirkung	403
14.2 Elektrodynamischer Lautsprecher	405
14.2.1 Aufbau	406
14.2.2 Abstrahlung	409

14.3	Elektrostatischer Lautsprecher	411
14.3.1	Aufbau und Analyse des elektrostatischen Gegentaktsystems	411
14.3.2	Abstrahlung des Gegentaktsystems	413
14.4	Flachlautsprecher	414
14.5	Frequenzweichen	417
14.6	Lautsprechergehäuse	418
14.6.1	Geschlossenes Gehäuse	419
14.6.2	Bassreflexgehäuse	420
14.6.3	Akustischer Trichter	421
14.7	Kopfhörer	425
14.7.1	Aussenohr-Übertragungsfunktion	425
14.7.2	Geschlossene und offene Hörer	427
14.7.3	Hörertypen	429
15	Schallaufzeichnung	433
15.1	Schallplattenverfahren	434
15.2	Digitalplattenverfahren	437
15.2.1	Compact Disc (CD)	438
15.2.2	Super-Audio CD (SACD)	443
15.2.3	Digital Versatile Disc für Audio (DVD-Audio)	444
15.2.4	Mini Disc (MD)	445
15.2.5	Audiodaten auf optischen Videomedien	446
15.3	Digitale elektronische Verfahren	447
15.4	Magnettonverfahren	449
15.5	Audio-Aufzeichnung beim Tonfilm	452
15.5.1	Analoger Lichtton	453
15.5.2	Digitaler Lichtton	454
15.5.3	Digitaler Film	458
16	Akustische Messtechnik	459
16.1	Akustische Messräume	460
16.1.1	Reflexionsarmer (reflexionsfreier) Raum	460
16.1.2	Hallraum	463
16.2	Aeroakustischer Windkanal	464
16.2.1	Reflexionsarmer Raum	465
16.2.2	Windkanal	467
16.3	Schallfeldmessungen im Wassertank	473
16.3.1	Hydrophone	473
16.3.2	Laseroptische Messung des Schallfeldes	481
16.4	Luftschall-Messungen in Hörschallbereich	482
16.4.1	Messungen des Schalldrucks	482
16.4.2	Messung des Schalldruckpegels	483
16.4.3	Messung des Lautstärkepegels	484
16.4.4	Messung der Schallschnelle	486

16.4.5	Messung der akustischen und mechanischen Impedanz	489
16.4.6	Messung der Schallintensität	490
16.4.7	Messung der abgestrahlten Schallleistung	494
16.4.8	Messung des akustischen Transmissionsgrades τ	498
16.4.9	Messung des Schallabsorptionsgrades von flächenhaften Strukturen	499
16.5	Messung der Richtcharakteristik von Mikrofonen	501
16.6	Messung der Richtcharakteristik von Lautsprechern	502
16.7	Bestimmung von Hörer-Übertragungsfaktoren mit Hilfe eines künstlichen Ohres	503
16.8	Klirrfaktormessungen	504
16.9	Intermodulationsverzerrungen	506
16.10	Messung von Körperschall	507
16.10.1	Beschleunigungsaufnehmer	507
16.10.2	Elektrodynamische Schnelleempfänger	509
16.10.3	Laserinterferometer und Laser-Doppler-Vibrometer	510
16.11	Akusto-optische Verfahren	514
16.11.1	Schlierenmesstechnik (Debye-Sears-Effekt)	514
16.12	Interferometrische Schallfeldmessung mit tomographischer Rekonstruktion	517
16.12.1	Einführung zur refraktometrischen Tomographie	517
16.12.2	Rekonstruktion des Schallfeldes mittels Tomographie	521
16.12.3	Messaufbau bei der refraktometrischen Tomographie	526
16.12.4	Vergleich mit Hydrophonmessungen	527
16.12.5	Messung in anderen transparenten Medien	530
16.12.6	Bewertung der Ergebnisse	533
16.13	Lärmessungen	534
16.13.1	Äquivalenter Dauerschallpegel (Mittelungspegel)	534
17	Unterwasserschall (Hydroakustik)	537
17.1	Schallausbreitung in Wasser	539
17.1.1	Schalldruckpegel und Schallintensitätspegel	539
17.1.2	Schallgeschwindigkeit	540
17.1.3	SOFAR-Kanal	541
17.1.4	Dämpfung von Wasserschall	542
17.1.5	Dispersion von Wasserschall	543
17.1.6	Besonderheiten bei der Ausbreitung von Wasserschall	544
17.2	Wasserschallwandler	546
17.3	Unterwasserortung (Echolote und Sonare)	549
17.3.1	Echolotverfahren	550
17.3.2	Sonarverfahren	552
17.3.3	Sonargleichung	555
17.3.4	Abbildungseigenschaften von Sonaren	559
17.3.5	Leistungsmerkmale von Sonaren	560
17.4	Akustische Unterwasser-Navigation	562

XIV Inhaltsverzeichnis

17.4.1	Geschwindigkeitsmessung mittels Doppler-Verfahren	562
17.5	Unterwasser-Nachrichtenübertragung	565
17.5.1	Grundlegende Aufgabe	565
17.5.2	Dämpfung	565
17.5.3	Rauschen (Ambient Noise)	566
17.5.4	Nachhall (Reverberation)	567
17.5.5	Dopplerverschiebung	568
17.6	Seismische Exploration	568
17.6.1	Bathymetrie	568
17.6.2	Kontinuierliche seismische Profilbestimmung	568
17.6.3	Akustische Meerestomographie (Ocean Acoustic Tomography OAT)	571
18	Ultraschall - Erzeugung, Detektion und Anwendung	573
18.1	Luftultraschall	575
18.1.1	Piezoelektrische Biegewandler	575
18.1.2	Breitband-Ultraschallwandler auf Polymerbasis	578
18.1.3	Kapazitive Ultraschallwandler	580
18.1.4	Positions- und Geschwindigkeitsmessung mit Ultraschall	581
18.1.5	Parametrischer Lautsprecher	584
18.2	Ultraschall in flüssigen Medien	587
18.2.1	Medizinische Diagnostik	587
18.2.2	Stand der heutigen B-Bild-Sonographie	610
18.2.3	Ultraschall-Kontrastmittel	610
18.2.4	Harmonic Imaging	614
18.2.5	Ultraschall-Tomographie	616
18.2.6	Compound-Verfahren (Bildüberlagerungsverfahren)	621
18.2.7	Akustische Mikroskopie	621
18.2.8	Ultraschall-Holographie	625
18.2.9	Ultraschall-Durchflussmessung	629
18.3	Ultraschall in festen Medien	646
18.3.1	Ultraschall-Verzögerungsleitungen	646
18.3.2	Akustische Oberflächenwellen-Bauelemente (SAW-Komponenten)	649
18.3.3	Bulk Acoustic Wave (BAW) Komponenten (Bauelemente auf der Basis akustischer Volumenwellen)	654
18.3.4	Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung	660
18.4	Technische Anwendungen von Leistung.ultraschall	667
18.4.1	Parametrischer Lautsprecher	667
18.4.2	Ultraschallreinigung	668
18.4.3	Ultraschalllöten	677
18.4.4	Ultraschall-Zerstäuber	680
18.4.5	Stehwellenlevitation für berührungslosen Greifer (Stehwellengreifer)	681

18.4.6	Medizinische Therapieverfahren auf der Basis von Hochleistungsultraschall	682
19	Aeroakustik: Schallerzeugung durch Strömung	691
19.1	Hiebtonerzeuger	691
19.2	Hoch-turbulente Strömung (Freistrahllärm)	698
19.3	Ventilatoren	701
19.4	Durchströmte Gitter	702
19.5	Mathematische Methoden in der Aeroakustik	702
19.5.1	Mathematische Modelle	703
19.5.2	Numerische Simulation	704
19.5.3	Experimentelle Analyse	706
19.5.4	Mikrofonarrays zur Lokalisierung von aeroakustischen Quellen	710
19.5.5	Korrelationsmesstechnik	718
19.6	Grundlegende Experimente zur Schallreduzierung an einem Hiebtonerzeuger (Vierkantzyylinderstumpf)	721
19.6.1	Vierkantzyylinderstumpf - Modellvariationen zur Schallreduzierung	721
19.6.2	Geometrievariationen des umströmten Vierkantzyinders	722
19.6.3	Schallfelder der Geometrievariationen	722
19.6.4	Untersuchung der leisesten und lautesten Geometrie	729
19.6.5	Zeitlich gemitteltes Strömungsfeld	729
19.6.6	Dynamisches Strömungsfeld	738
19.6.7	Interaktion Strömungsfeld – Schallfeld	742
19.6.8	Richtcharakteristik	744
19.6.9	Normierung der induzierten Schallpegel (Mach-Zahl-Exponent)	746
19.6.10	Beeinflussung des Schallfeldes durch Endscheiben (Dreidimensionalität der Strömung)	748
19.6.11	Zusammenfassung der Ergebnisse (Hiebtonerzeuger)	752
20	Numerische Verfahren der Akustik - Computational Acoustics	757
20.1	Akustische finite Elemente	758
20.2	Abstrahlung der akustischen Welle in den freien Raum - Absorbierende Randbedingungen für FEM	762
20.2.1	Infinite Elemente	763
20.2.2	Absorbierende Randbedingungen	764
20.2.3	Perfectly Matched Layer (PML) Technik	768
20.3	Nicht-Konforme Gitter	780
20.3.1	Prinzip	780
20.3.2	Übergangsbedingungen	780
20.3.3	Mathematische Kopplung der Teilgebiete	781

20.3.4 Ortsdiskretisierung	782
20.3.5 Akustische Pulse in nicht-konformen Gittern	782
20.4 Akustische Randelemente (Acoustic Boundary Element Method (BEM))	784
20.5 Vergleich zwischen FEM und BEM in der Akustik.....	786
20.6 Fast-Multipol BEM (FMBEM)	788
20.7 Gekoppelte Finite-Elemente-Randelemente-Verfahren (FEM-BEM-Kopplung in der Akustik).....	790
20.8 Finite-Elemente-Methode für akustische Felder in strömenden Medien	792
20.9 Finite-Elemente-Methode für nichtlineare akustische Felder ..	794
20.10 Fluid-Struktur-Kopplung	797
20.10.1 Schwache Fluid-Struktur-Kopplung	797
20.10.2 Starke Fluid-Struktur-Kopplung.....	798
20.11 Geometrische Akustik (Ray-Tracing-Verfahren) für die hybride numerische Simulation.....	802
20.11.1 Mathematische Beschreibung der Geometrischen Akustik (Ray-Tracing-Gleichungen) in ruhenden und fließenden Medien	802
20.12 Die Helmholtz-Integral-Ray-Tracing-Methode (HIRM)	805
20.12.1 Helmholtz Integral.....	806
20.12.2 Neues Randintegral für strömende Medien (Modifiziertes Helmholtz-Integral)	807
20.12.3 Ermittlung der Ray Tracing Parameter.....	810
20.13 Finite-Elemente-Methode für elektroakustische Wandler	812
21 Praktische Anwendungsbeispiele aus dem Bereich der Numerischen Akustik	821
21.1 Computerunterstützte Entwicklung von elektrodynamischen Lautsprechern	821
21.2 Schallschutzaun	830
21.3 Ultraschall-Durchflussmesser	833
21.4 Numerische Berechnung eines Ultraschall-Durchflussmessers mit FEM-HIRM	836
21.4.1 FEM-HIRM Modell.....	839
21.4.2 Praktische Anwendung von FEM-HIRM	842
21.5 Ultraschallantennen für die medizinische Bildgebung.....	847
21.5.1 Lineare phasengesteuerte Array-Antenne	848
21.5.2 Berechnung von Ultraschall-Ringantennen	853
21.6 Leistungsultraschallwandler	857
21.7 Schallabstrahlung von Maschinen-Automobilakustik	859
21.7.1 Ölwanne	860
21.7.2 PKW-Motor	862
21.7.3 Abgasrückführsystem eines Dieselmotors	865
21.8 Geräuschemission von Transformatoren	867

22 Numerische Verfahren der Aeroakustik	873
22.1 Grundlagen	873
22.2 Hybride Verfahren auf der Basis akustischer Analogien	877
22.2.1 Lighthillsche Analogie	877
22.2.2 Volumenintegral-Formulierungen	879
22.2.3 Oberflächenintegralformulierungen	882
22.2.4 Variationsformulierung der Lighthillschen Analogie ..	884
22.3 Auf Störgrößen basierende Ansätze	885
22.3.1 Methoden auf der Basis der linearisierten Euler-Gleichungen (LEE)	885
22.3.2 Akustische Störungsrechnung	887
22.3.3 Störungsgleichungen für den kompressiblen Fall	889
22.4 Heterogene Gebietszerlegung in der Aeroakustik	889
22.5 Numerisches Beispiel: Umströmter Zylinder	890
22.5.1 Strömungsinduzierter Lärm eines auf festem Untergrund montierten Zylinders	890
A In der Akustik benötigte Vektoroperationen	901
B Verzeichnis der wichtigsten Formelzeichen	903
Literaturverzeichnis	907
Index	931