

Reinhard Lerch • Gerhard M. Sessler • Dietrich Wolf

# Technische Akustik

Grundlagen und Anwendungen

4ü Springer

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Schall in Gasen und Flüssigkeiten</b>	<b>7</b>
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
<b>3</b>	<b>Reflexion, Brechung, Beugung von Schall</b>	<b>55</b>
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

<b>4</b>	<b>Nichtlineare Wellenausbreitung in Gasen und Flüssigkeiten</b>	<b>77</b>
4.1	Grundgleichungen für den nichtlinearen Fall	77
4.2	Aufsteilung 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
<b>5</b>	<b>Akustische Wellen in festen Körpern</b>	<b>93</b>
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	Kirchhoffsche 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
<b>6</b>	<b>Schallquellen, Schallabstrahlung</b>	<b>133</b>
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
<b>7</b>	<b>Physiologische und psychologische Akustik</b> . . . . .	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
<b>8</b>	<b>Raumakustik</b> . . . . .	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
<b>9</b>	<b>Bauakustik</b> . . . . .	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
<b>10</b>	<b>Lärm</b> . . . . .	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 . . . . . S. . . . .	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 Lärnschäden. . . . .	278
10.3.3	Störungen der Sprachkommunikation und Leistungsstörungen. . . . .	278
10.3.4	Schlafstörungen. . . . .	279
10.3.5	Belästigung. . . . .	279
<b>11</b>	<b>Elektromechanische Analogien . . . . .</b>	<b>281</b>
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 Masseelement. . . . .	290
11.4.2	Akustisches Federelement. . . . .	291
11.4.3	Akustisches Dämpfungselement (Reibungselement) . . . . .	292
11.5	Akustische Grundsaltungen. . . . .	293
11.5.1	Tonraum. . . . .	293
11.5.2	Helmholtz-Resonator. . . . .	294
11.5.3	Praktische Anwendungsbeispiele von akustischen Grundsaltungen. . . . .	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

<b>12 Grundlagen der elektroakustischen Wandler</b> . . . . .	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
<b>13 Mikrofone</b> . . . . .	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
<b>14 Schallsender</b> . . . . .	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	Elektrostatistischer 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
<b>15</b>	<b>Schallaufzeichnung</b> . . . . .	<b>433</b>
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
<b>16</b>	<b>Akustische Messtechnik</b> . . . . .	<b>459</b>
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 $r$	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 Schnellempfänger	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	Lärmmessungen	534
16.13.1	Äquivalenter Dauerschallpegel (Mittelungspegel)	534
<b>17</b>	<b>Unterwasserschall (Hydroakustik)</b>	<b>537</b>
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 Doppiler-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
<b>18</b>	<b>Ultraschall - Erzeugung, Detektion und Anwendung</b>	<b>573</b>
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	Harmonie 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 Leistungsultraschall	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 (Vierkantzylinderstumpf). . . . . 721

19.6.1 Vierkantzylinderstumpf - Modellvariationen zur  
Schallreduzierung . . . . . • . . . . . 721

19.6.2 Geometrie Variationen des umströmten  
Vierkantzylinders . . . . . 722

19.6.3 Schallfelder der Geometrievariationen . . . . . 722

19.6.4 Untersuchung der leisesten und lautesten Geometrie . . 729

19.6.5 Zeitlich gemittelttes 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 Schallschutzzaun . . . . . 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

F 21.8 Geräuschemission von Transformatoren . . . . . 867

<b>22 Numerische Verfahren der Aeroakustik . . .</b>	<b>873</b>
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 . . . . .	
22.4 Heterogene Gebietszerlegung in der Aeroakustik . . . . .	
22.5 Numerisches Beispiel: Umströmter Zylinder . . . . .	890
22.5.1 Strömungsinduzierter Lärm eines auf festem Untergrund montierten Zylinders . . . . .	890
<b>A In der Akustik benötigte Vektoroperationen . . . . .</b>	<b>901</b>
<b>B Verzeichnis der wichtigsten Formelzeichen . . . . .</b>	<b>903</b>
<b>Literaturverzeichnis . . . . .</b>	<b>907</b>
<b>Index . . . . .</b>	<b>931</b>