

---

# Inhaltsverzeichnis

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

<b>4</b>	<b>Nichtlineare Wellenausbreitung in Gasen und Flüssigkeiten</b>	<b>77</b>
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
<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 .....	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
<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 Masselement .....	290
11.4.2	Akustisches Federelement .....	291
11.4.3	Akustisches Dämpfungselement (Reibungselement) ..	292
11.5	Akustische Grundschaltungen .....	293
11.5.1	Tonraum .....	293
11.5.2	Helmholtz-Resonator .....	294
11.5.3	Praktische Anwendungsbeispiele von akustischen Grundschaltungen .....	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	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
<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 Schalleistung	494
16.4.8	Messung des akustischen Transmissionsgrades $\tau$	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 refraktrometrischen 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

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
<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	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 Leistungultraschall .....	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 Hochleistungsschall . . . . .	682
<b>19</b>	<b>Aeroakustik: Schallerzeugung durch Strömung . . . . .</b>	<b>691</b>
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	Geometrievariationen 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
<b>20</b>	<b>Numerische Verfahren der Akustik - Computational Acoustics . . . . .</b>	<b>757</b>
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
<b>21</b>	<b>Praktische Anwendungsbeispiele aus dem Bereich der Numerischen Akustik .....</b>	<b>821</b>
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
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