

Inhaltsverzeichnis

1	Wandler für Luftschallmessungen	1
Dr.-Ing. Erhard Werner		
1.1	Luftschall als Phänomen und Untersuchungsobjekt	1
1.1.1	Schallquellen	2
1.1.2	Schallfelder	4
1.1.3	Signalgrößen und Bereiche	4
1.1.3.1	Schalldruck	5
1.1.3.2	Schallschnelle	5
1.1.3.3	Schallintensität	6
1.1.3.4	Weitere Schallgrößen	6
1.2	Allgemeine Einflüsse auf das Schallfeld	6
1.2.1	Einflüsse der Raumeigenschaften	7
1.2.2	Klimatische und sonstige Einflüsse	7
1.3	Mikrofoneinfluss und Kalibrierung	8
1.3.1	Rückwirkung des Sensors auf das Schallfeld	8
1.3.2	Akustische Effekte innerhalb des Sensors	9
1.3.3	Effekte bei der Umwandlung der Schallgrößen	10
1.3.3.1	Lineare Verzerrungen	10
1.3.3.2	Nichtlineare Verzerrungen	10
1.3.3.3	Eigenstörsignale	11
1.3.4	Kalibrierung	11
1.4	Anforderungen an Mikrofone	14
1.4.1	Messmikrofone	14
1.4.1.1	Mikrofone für den Audiobereich	14
1.4.1.2	Mikrofone für Infraschall	15
1.4.1.3	Mikrofone für Ultraschall	16
1.4.2	Mikrofone für den Allgemeingebrauch	16
1.4.3	Mikrofone für sonstige Anwendungen	17
1.4.4	Datengarantie	18
1.5	Wandlerprinzipien	19
1.5.1	Wandler mit Membran	21

1.5.1.1	Induktive Wandler	22
1.5.1.2	Elektrodynamische Mikrofone	23
1.5.1.3	Magnetische Mikrofone	25
1.5.1.4	Kapazitive Wandler	26
1.5.1.5	Niederfrequenz-Kondensatormikrofon	26
1.5.1.6	Hochfrequenz-Kondensatormikrofon	29
1.5.1.7	Piezowandler	29
1.5.1.8	Optische und sonstige Wandler	30
1.5.2	Membranlose Schallwandler	31
1.5.2.1	Thermoelektrische Wandler	31
1.5.2.2	Optische und sonstige Wandler	32
1.5.3	Akustisch wirksame Konstruktionselemente	33
1.5.3.1	Mehrfaheingänge (Mehrwegeempfänger)	33
1.5.3.2	Fokussierende Bauteile	35
1.5.3.3	Interferenzrohre	36
1.5.3.4	Sonden	36
1.5.3.5	Weitere externe Elemente	37
1.6	Beispiele aus Klein- und Großserienherstellung	38
1.6.1	Dynamische Druckmikrofone	39
1.6.1.1	Reportagemikrofon MD 21	39
1.6.1.2	Sondenmikrofon MD 321	40
1.6.2	Dynamische Richtmikrofone	41
1.6.2.1	Studio-Richtmikrofon MD 441	41
1.6.2.2	Zweiwegemikrofon D 222	42
1.6.2.3	Bändchenmikrofon M 130	43
1.6.3	Niederfrequenz-Kondensatormikrofone	44
1.6.3.1	Großmembranmikrofon M147 Tube	44
1.6.3.2	Kleinmikrofon MK 6/CMC 6	45
1.6.4	Hochfrequenz-Kondensatormikrofone	46
1.6.4.1	Studiomikrofon MKH 800	46
1.6.5	Mess-Kondensatormikrofone	47
1.6.5.1	Freifeldkapsel 4133	47
1.6.6	Thermisches Mikrofon Microflown Scanning Probe 0°	48
1.6.7	Optisches Mikrofon MO 2000	49
1.6.8	Infraschall-Mikrofone	50
1.6.8.1	Breitband-Hochfrequenzmikrofon MKH 110	50
1.6.8.2	Tieftonmikrofon Model 50	51
	Literaturverzeichnis	52
2	Schallpegelmesstechnik und ihre Anwendung	55
	Dr.-Ing. Joachim Feldmann	
2.1	Allgemeines, Aufgaben	55
2.1.1	Schallimmission	55
2.1.2	Schallemission	56
2.2	Mess- und Bewertungsgrößen	56

2.2.1	Schallstärke	56
2.2.2	Frequenzbewertung	57
2.2.3	Zeitbewertung	57
2.2.4	Maximalpegel	60
2.2.5	Taktmaximalpegel	60
2.2.6	Mittelungspegel, Wirkpegel	61
2.2.7	Stichprobenverfahren zur Ermittlung des Mittelungspegels	64
2.2.8	Schalldosis, Schallexpositionspegel	65
2.2.9	Messdauer	66
2.2.10	Zeitliche Messdurchführung	67
2.2.11	Messprotokoll	67
2.2.12	Beurteilungsgrößen	68
2.2.13	Spezielle Beurteilungsgrößen	70
2.3	Messgeräte	70
2.3.1	Schallpegelmesser	71
2.3.1.1	Schallpegelmesser Klasse 1, Messgenauigkeit $\pm 0,5$ dB	71
2.3.1.2	Schallpegelmesser Klasse 2, Messgenauigkeit ± 1 dB	71
2.3.1.3	Schallpegelmesser Klasse 3, Messgenauigkeit $\pm 1,5$ dB	71
2.3.1.4	Integrierende Messgeräte (Klasse 1 und 2)	71
2.3.1.5	Sonstige Eigenschaften	72
2.3.2	Klassierende Messgeräte	73
2.3.3	Datenerfassung	73
2.3.4	Frequenzfilter	73
2.4	Erfassung und Beurteilung der Geräuschemission	74
2.4.1	Allgemeines	74
2.4.2	Geräte, Maschinen, Baugruppen u.ä.	74
2.4.2.1	Hüllflächen- oder auch Freifeldverfahren	74
2.4.2.2	Hallraumverfahren	75
2.4.2.3	Kennzeichnung technischer Schallquellen	76
2.4.3	Maschinen und Geräte zur Verwendung im Freien	78
2.4.4	Wasserinstallation, haustechnische Anlagen	78
2.4.5	Mobile Schallquellen	79
2.4.5.1	Straßenfahrzeuge	80
2.4.5.2	Schienenfahrzeuge	81
2.4.5.3	Wasserfahrzeuge	84
2.4.5.4	Luftfahrzeuge	85
2.4.6	Ausgedehnte Anlagen, Straßen	89
2.4.6.1	Punktquelle über dem Boden	90
2.4.6.2	Endlich lange Linienschallquelle (Züge, Förderanlagen, lange Baustellen, dicht befahrene Straßen usw.)	90

2.4.6.3	Flächenschallquellen (Fabrikhallenwände, Gebäudetore etc.)	91
2.5	Erfassung und Beurteilung der Geräuschimmission	92
2.5.1	Am Arbeitsplatz	92
2.5.2	Gewerbe- und Industrielärm	96
2.5.2.1	Allgemeines	96
2.5.2.2	Erfassung und Beurteilung (TA Lärm)	96
2.5.2.3	Tieffrequente Geräusche	99
2.5.3	Baulärm	100
2.5.4	Verkehrslärm	101
2.5.4.1	Straßen-, Schienen- und Schiffsverkehr	101
2.5.4.2	Luftfahrzeuge	103
	Literaturverzeichnis	106
3	Einmessung und Verifizierung raumakustischer Gegebenheiten und von Beschallungsanlagen	115
	Prof. Dr.-Ing. habil. Wolfgang Ahnert und Dipl.-Phys. Stefan Feistel	
3.1	Einteilung, Zuordnung	115
3.2	Messverfahren	116
3.2.1	Klassische Schallpegelmessung und –bewertung	116
3.2.2	Messmethoden basierend auf Fourieranalyse	117
3.2.2.1	Grundlagen	117
3.2.2.2	Klassische Anregung	120
3.2.2.3	Sweep-Verfahren	122
3.2.2.4	MLS-Technik	123
3.2.2.5	Noise-Applikation	124
3.2.2.6	TDS-Verfahren und -Technik	127
3.2.2.7	Messverfahren mit frei wählbaren Anregungssignalen	127
3.2.2.8	Messparameter	131
3.3	Raumakustische Messungen	136
3.3.1	Vorbemerkung	136
3.3.2	Festlegung der Messorte	137
3.3.3	Messung der raumakustischen Gegebenheiten	137
3.3.4	Zeitgrößen	140
3.3.5	Frequenzgrößen	142
3.3.6	Wasserfalldarstellung	142
3.3.7	Spezielle Anwendungen	143
3.3.7.1	Filterung und Mittelung	143
3.3.7.2	In Situ Messungen des Schallabsorptionsgrades	145
3.3.7.3	Messung von Scattering-Koeffizienten	146
3.3.7.4	Modenanalyse	148
3.4	Anwendung in der Beschallungstechnik	149
3.4.1	Elektrische Überprüfung	149
3.4.1.1	Subjektive Kontrolle	149

3.4.1.2	Elektrisches Einmessen	151
3.4.2	Akustisches Einmessen der Beschallungsanlage	151
3.4.2.1	Vorbemerkung	151
3.4.2.2	Ermittlung der Schallpegelverteilung	152
3.4.2.3	Maximaler Schalldruckpegel	154
3.4.2.4	Messung des Wiedergabefrequenzganges	154
3.4.2.5	Ermittlung der Sprachverständlichkeit STI	156
3.4.2.6	Rauhigkeiten und Fehlortung	158
3.4.2.7	Subjektive Beurteilung	159
3.4.3	Weitere Messungen	160
3.4.3.1	Alignment-Messungen	160
3.4.3.2	Rückkopplungstest	161
3.4.3.3	Polungstest	161
3.5	Messtechnik	161
3.5.1	Hardwarelösungen	162
3.5.2	Softwarelösungen	163
3.6	Schlussbemerkungen	165
Literaturverzeichnis	165
A	Anlage zu Kapitel 3: Raumakustische Kriterien	167
A.1	Nachhallzeit T	167
A.2	Bassverhältnis BR	172
A.3	Energiekriterien	172
A.3.1	50-ms-Anteil, D_{50} für Sprache	173
A.3.2	Deutlichkeitsmaß C_{50} für Sprache	173
A.3.3	Artikulationsverlust AL_{cons} für Sprache	174
A.3.4	Speech Transmission Index STI und STIPa	175
A.3.5	Schwerpunktzeit t_s	177
A.3.6	Echokriterium EK	178
A.3.7	Klarheitsmaß C_{80} für Musik	179
A.3.8	Interauraler Kreuzkorrelationskoeffizient IACC180	
A.3.9	Stärkemaß G	181
A.3.10	Seitenschallgrade Lateral Efficiency LE, Lateral Energy Fraction LF und Lateral Fraction Coefficient LFC	182
Literaturverzeichnis	183
4	Bauakustische Messungen	185
Dr.-Ing. Heinz-Martin Fischer		
4.1	Allgemeine Hinweise	185
4.2	Aufgabenstellungen und Methodik der bauakustischen Messtechnik	186
4.2.1	Aufgabenstellungen der bauakustischen Messtechnik	186
4.2.2	Methodik der bauakustischen Messtechnik	187
4.2.2.1	Emission	187
4.2.2.2	Transmission	188

	4.2.2.3	Immission	190
4.3	4.2.3	Messtechnische Größen und Kenngrößen.....	190
	4.3.1	Bauakustische Mess- und Berechnungsverfahren in der Normung .	192
	4.3.2	Nationale und internationale Normen	192
		Europäische Berechnungsverfahren für den baulichen	
		Schallschutz	193
	4.3.2.1	Übersicht und Methodik der EN 12354	193
	4.3.2.2	Luftschalldämmung zwischen Räumen nach	
		EN 12354-1	194
	4.3.2.3	Trittschalldämmung zwischen Räumen nach	
		EN 12354-2	198
	4.3.2.4	Luftschalldämmung gegen Außenlärm nach	
		EN 12354-3	200
	4.3.2.5	Schallübertragung von Räumen ins Freie	
		nach EN 12354-4	201
	4.3.2.6	Geräusche haustechnischer Anlagen nach	
		EN 12354-5	201
4.4		Messung der Luftschalldämmung und Luftschallübertragung	203
	4.4.1	Grundprinzip der Schalldämmungsmessung	203
	4.4.2	Kennzeichnende Größen zur Beschreibung der	
		Schalldämmung und des Schallschutzes	206
	4.4.2.1	Definition und Anwendung der Kenngrößen ..	206
	4.4.2.2	Frequenzabhängigkeit der Kenngrößen	209
	4.4.2.3	Einzahlangaben und Spektrum-	
		Anpassungswerte für Schalldämmung und	
		Schallschutz	209
	4.4.3	Schalldämmung als Bauteil- und Systemeigenschaft	211
	4.4.3.1	Schalldämmung als Bauteileigenschaft	211
	4.4.3.2	Schalldämmung als Systemeigenschaft	219
	4.4.4	Prüfstände für die Messung der Luftschalldämmung	240
	4.4.5	Vorgehen bei der Messung der Luftschalldämmung	245
	4.4.5.1	Messung der Luftschallpegel	245
	4.4.5.2	Messung der Nachhallzeit	258
	4.4.5.3	Messung des Verlustfaktors	260
	4.4.6	Laborverfahren zur Messung der Luftschalldämmung	263
	4.4.6.1	Messung der Luftschalldämmung von	
		Bauteilen in Prüfständen	263
	4.4.6.2	Luftschalldämmung kleiner Bauteile und	
		Elemente	263
	4.4.6.3	Verbesserung der Luftschalldämmung durch	
		Vorsatzschalen	264
	4.4.7	Messung der Luftschalldämmung in Gebäuden	267
	4.4.7.1	Messung der Luftschalldämmung nach dem	
		Standardverfahren	268

	4.4.7.2	Besonderheiten bei Messungen der Schalldämmung in Gebäuden	271
	4.4.7.3	Kurzprüfverfahren für Messungen in Gebäuden	272
	4.4.7.4	Messung der Luftschalldämmung von Außenbauteilen an Gebäuden	273
4.4.8		Alternative Verfahren zur Messung der Luftschalldämmung	276
	4.4.8.1	Neue Messverfahren nach ISO 18233	277
	4.4.8.2	Bestimmung der Schalldämmung mit Schallintensitätsmessungen	277
	4.4.9	Flankierende Luftschallübertragung	278
4.5		Messung der Trittschalldämmung und Trittschallübertragung	279
	4.5.1	Grundprinzip der Messung der Trittschalldämmung	280
	4.5.2	Das Norm-Hammerwerk und seine Anregeeigenschaften	284
	4.5.3	Alternativen zum Norm-Hammerwerk	286
	4.5.3.1	Grundsätzliche Fragestellungen zur Anwendung des Norm-Hammerwerks	287
	4.5.3.2	Genormte Körperschallquellen zur Messung der Trittschalldämmung	288
	4.5.3.3	Nicht genormte Schallquellen zur Körperschallanregung	292
	4.5.4	Kennzeichnende Größen zur Beschreibung der Trittschalleigenschaften von Bauteilen und des Trittschallschutzes in Gebäuden	295
	4.5.4.1	Trittschallpegel im Prüfstand und in Gebäuden	295
	4.5.4.2	Frequenzabhängigkeit des Trittschallpegels ..	297
	4.5.4.3	Einzahlangaben und Spektrum-Anpassungswerte für den Trittschallpegel ..	297
	4.5.4.4	Weitere Kenngrößen zur Beschreibung trittschalldämmender Eigenschaften	298
	4.5.5	Trittschalldämmung als Bauteil- und Systemeigenschaft ..	301
	4.5.5.1	Bauteileigenschaften	302
	4.5.5.2	Systemeigenschaften	304
	4.5.6	Prüfstände für die Trittschalldämmung	305
	4.5.7	Vorgehen bei der Messung der Trittschalldämmung	307
	4.5.7.1	Messmethoden zur Trittschallmessung	307
	4.5.7.2	Messgrößen und Messgeräte	307
	4.5.7.3	Körperschallanregung der Decke	307
	4.5.7.4	Messung des Trittschallpegels	308
	4.5.7.5	Messung der Nachhallzeit	309
	4.5.7.6	Fremdgeräuschkorrektur und flankierende Luftschallübertragung	309
	4.5.7.7	Messung des Verlustfaktors	311
	4.5.7.8	Messung des Trittschallpegels bei tiefen Frequenzen	311

4.5.7.9	Besonderheiten bei Trittschallmessungen in Gebäuden	311
4.5.7.10	Kurzprüfverfahren für Trittschallmessungen in Gebäuden	312
4.5.8	Messung der Trittschallminderung	313
4.5.8.1	Grundprinzip der Messung der Trittschallminderung	313
4.5.8.2	Trittschallminderung auf massiven Decken	314
4.5.8.3	Einzahlangaben für die Trittschallminderung	316
4.5.8.4	Trittschallpegelminderung auf leichten Bezugsdecken	317
4.5.8.5	Kurzprüfverfahren für die Trittschallminderung	319
4.5.9	Flankierende Trittschallübertragung	319
4.5.9.1	Flankierende Übertragung bei der Trittschallmessung	319
4.5.9.2	Norm-Flankentrittschallpegel durchlaufender Bauteile	320
4.5.10	Gehschall	323
	Literaturverzeichnis	324
5	Messung der Schallleistung	335
	Prof. Dr.-Ing. Michael Möser	
5.1	Einleitung	335
5.1.1	Schallfeld im Freien	335
5.1.2	Schallfeld in Räumen	336
5.1.3	Körperschall-Leistung	337
5.2	Schallenergie, Schallleistung und Schallintensität	337
5.3	Schallleistungspegel und Schallintensitätspegel	340
5.4	Leistungstransport bei fortschreitenden oder stehenden Wellen	341
5.4.1	Fortschreitende Wellen	341
5.4.2	Stehende Wellen	341
5.4.3	Teilweise Reflexion	344
5.5	Hüllflächen-Verfahren	345
5.5.1	Normen	348
5.6	Hallraum-Verfahren	348
5.6.1	Normen	349
5.7	Intensitäts-Messverfahren	350
5.7.1	Beschreibung des Verfahrens	353
5.7.2	Zeitbereichsverfahren	355
5.7.3	Frequenzbereichsverfahren	355
5.7.3.1	Monofrequente Signale	355
5.7.3.2	Signale mit beliebigem Frequenzinhalt	356
5.7.4	Messfehler und Grenzen des Verfahrens	359
5.7.4.1	Hochfrequenter Fehler	359
5.7.4.2	Tieffrequenter Fehler	360

5.7.5	Normen	363
Literaturverzeichnis		363
6	Akustische Antennen	365
Prof. Dr.-Ing. Ulf Michel und Prof. Dr.-Ing. Michael Möser		
6.1	Akustische Antenne für ebene Wellen	366
6.1.1	Äquidistante Mikrofon-Anordnungen	366
6.1.2	Einfluss der Wellenlänge	371
6.1.3	Wichtung der Mikrofonsignale	374
6.2	Akustische Antenne für Kugelwellen	376
6.2.1	Kugelwellen	376
6.2.2	Akustische Antenne im Zeitbereich	378
6.2.3	Akustische Antenne im Frequenzbereich	379
6.2.4	Akustische Antenne mit Kreuzspektren	379
6.2.5	Abtastbedingungen für Auswertung im Zeitbereich	382
6.2.6	Richtcharakteristik einer akustischen Antenne	385
6.3	Analyse von Antenneneigenschaften am Beispiel eines Linien-Arrays	386
6.3.1	Hauptkeule, Nebenkeule, Gitterkeule für Punktquellen ..	386
6.3.2	Einfluss des Mikrofonabstandes im Verhältnis zur Wellenlänge	388
6.3.3	Einfluss einer seitlichen Quellposition	389
6.3.4	Mikrofonabstand zur Vermeidung von Gitterkeulen ..	390
6.3.5	Einfluss eines Fokusfehlers	391
6.4	Zweidimensionale und dreidimensionale Arrays	392
6.4.1	Kreuz-Array und X-Array	392
6.4.2	Nichtredundante Arrays	393
6.4.3	Ring-Array	394
6.4.4	Spiral-Array	397
6.4.5	Kugel-Array	400
6.4.6	Notwendigkeit von frequenzabhängigen Unter-Arrays ..	402
6.4.6.1	Lineare Schachtel-Arrays	403
6.4.6.2	Messungen an spurgebundenen Fahrzeugen und Straßenfahrzeugen	404
6.4.6.3	Überflugmessungen	404
6.5	Einsatz in Windkanälen	406
6.5.1	Emissionskoordinaten	406
6.5.2	Geschlossener Windkanal	408
6.5.3	Offener Windkanal	409
6.6	Bewegte Quellen	410
6.7	Verbesserte Auswerteverfahren	411
6.7.1	Vernachlässigung der Leistungsspektren der Mikrofonsignale	411
6.7.2	Verbesserte Auswertung von Kreuz- und X-Arrays ..	413
6.7.3	Orthogonales Beamforming	414

6.8	Inverse Verfahren	416
6.8.1	Entfaltung mit simulierten Richtcharakteristiken	416
6.8.2	Entfaltung mit CLEAN-SC	418
6.8.3	Approximation der Kreuzspektralmatrix, SEM	418
6.8.4	Quellen mit nicht kugelförmiger Richtcharakteristik, SODIX	419
6.9	Einfluss von Wänden	420
6.9.1	Ebene Wand	420
6.9.1.1	Montage der Mikrofone auf der Wand	420
6.9.1.2	Antenne über dem Boden	421
6.9.2	Zwei Wände im Winkel von 90 Grad	422
6.10	Anforderung an Mikrofone und Präzision der Mikrofonpositionen	422
	Literaturverzeichnis	423
7	Körperschall-Messtechnik	427
	Dr.-Ing. Joachim Feldmann	
7.1	Einführung	427
7.2	Körperschall-Messgrößen	428
7.3	Messwandlerprinzipien	432
7.3.1	Auslenkungswandler	432
7.3.1.1	Mechanischer Taster	432
7.3.1.2	Wirbelstromwandler	433
7.3.2	Schwingschnellewandler	434
7.3.2.1	Elektrodynamischer Wandler	434
7.3.2.2	Elektromagnetischer Wandler	435
7.3.2.3	Laser-Dopplervibrometer	436
7.3.3	Beschleunigungswandler	437
7.3.3.1	Elektromagnetischer Wandler	437
7.3.3.2	Piezoelektrischer Wandler	438
7.3.3.3	Kapazitiver Wandler	439
7.3.3.4	Piezoresistiver Wandler	440
7.4	Piezoelektrische Wandler	441
7.4.1	Beschleunigungssensor	441
7.4.1.1	Piezoelektrischer Effekt	441
7.4.1.2	Piezoelektrische Materialien	442
7.4.1.3	Elektromechanische Betrachtungen	442
7.4.1.4	Übertragungseigenschaften von Beschleunigungssensoren und Einfluss der Signalaufbereitung	446
7.4.1.5	Phasengang	451
7.4.1.6	Linearität und Amplitudendynamik	452
7.4.1.7	Verhalten bei transienten Schwingungen	452
7.4.1.8	Querempfindlichkeit	456
7.4.1.9	Konstruktionsvarianten	457
7.4.1.10	Ankopplungseinflüsse	458

7.4.1.11	Umgebungseinflüsse	464
7.4.1.12	Kalibrierung	468
7.4.2	Mechanisches Filter	469
7.4.3	Kraftsensor	470
7.4.3.1	Aufbau	470
7.4.3.2	Frequenzverhalten	470
7.4.3.3	Signalaufbereitung	474
7.4.3.4	Bauformen	474
7.4.3.5	Ankopplung	474
7.4.3.6	Kalibrierung	475
7.4.4	Impedanzmesskopf	475
7.4.5	Drehmomentsensor	479
7.5	Drehschwingungen	479
7.6	Körperschallintensität	483
7.6.1	Theoretische Grundlagen	483
7.6.2	Messtechnische Realisation	485
7.6.3	Anwendungsbeispiel	487
7.7	Schwingerregung	488
7.7.1	Elektrodynamischer Schwingerreger	488
7.7.1.1	Funktionsweise	488
7.7.1.2	Übertragungsverhalten	489
7.7.1.3	Ankopplungsfragen	493
7.7.2	Impulshammer	493
7.7.2.1	Aufbau	493
7.7.2.2	Frequenzgang	494
7.7.2.3	Kalibrierung	494
7.7.2.4	Anmerkungen zur Signalverarbeitung	496
	Literaturverzeichnis	496
8	Modalanalyse	499
	Dipl.-Ing. Judith Kokavecz	
8.1	Anwendungsgebiete	499
8.2	Idee und Grundlagen der Modalanalyse	500
8.2.1	Schwingungen und Moden	500
8.2.2	Annahmen über das System	501
8.2.3	Übertragungsverhalten einer Struktur	502
8.2.4	Analytische Modelle	503
8.2.5	Modalmodelle	504
8.3	Analytische Schwingungsuntersuchungen	505
8.3.1	SDOF System – Der Einmassenschwinger	505
8.3.2	MDOF Systeme	508
8.4	Experimentelle Modalanalyse	517
8.4.1	Die Randbedingungen (Lagerung)	517
8.4.2	Auswahl der Messpunkte (Diskretisierung)	518

8.4.3	Anregungsarten und Messung der Übertragungsfunktionen	519
8.4.3.1	Anregung mit dem Shaker	520
8.4.3.2	Anregung mit dem Impulshammer	520
8.4.4	Modalparameter ermitteln	521
8.4.4.1	SDOF-Verfahren	522
8.4.4.2	MDOF-Verfahren	527
8.4.5	Modellbildung	529
8.4.6	Darstellung der Ergebnisse	530
8.5	Beispiele aus der Praxis	531
8.5.1	Balken	531
8.5.2	Komplexe Strukturen	532
	Literaturverzeichnis	535
9	Digitale Signalverarbeitung in der Messtechnik	537
	Prof. Dr. Michael Vorländer	
9.1	Signale und Systeme	539
9.2	Impulsantwort und Übertragungsfunktion	540
9.2.1	Der Begriff der Faltung	540
9.2.2	Übertragungsfunktion	542
9.3	Fouriertransformation	542
9.4	Digitalisierung von Messsignalen	544
9.4.1	Abtasttheorem	545
9.5	Diskrete Fourier-Transformation DFT	547
9.6	Fast Fourier Transformation FFT	548
9.6.1	Mögliche Fehler	550
9.7	Digitale Filter	551
9.7.1	IIR-Filter	553
9.7.2	FIR-Filter	554
9.8	Echtzeit-Frequenzanalyse	555
9.9	Messung von Übertragungsfunktionen und Impulsantworten	556
9.10	2-Kanal-FFT-Technik	559
9.10.1	Generierung von angepassten Messsignalen	560
9.10.2	Messung bei stochastischen Signalen	563
9.11	Direkte (aperiodische) Entfaltung	565
9.12	Maximalfolgen	566
9.12.1	Maximalfolgen – „MLS“	567
9.12.2	Hadamard-Transformation	569
9.13	Fehlerquellen der digitalen Messtechnik	571
9.13.1	Störgeräusche	572
9.13.2	Nichtlinearitäten	572
9.13.3	Zeitvarianzen	572
	Literaturverzeichnis	575

10 Messung von Schallabsorption und Luftschall-Impedanz	577
Prof. Dr.-Ing. Michael Möser	
10.1 Einleitung	577
10.2 Grundbegriffe und Größen	578
10.3 Messungen im Kundtschen Rohr	580
10.3.1 Schallausbreitung im Kundtschen Rohr	583
10.3.2 Mini-Max-Verfahren	585
10.3.3 Wellen-Trennung	591
10.3.4 Bedeutung des schrägen Einfalls	592
10.3.5 Normen	594
10.4 Messung des Absorptionsgrades im Hallraum	595
10.5 In-situ-Messverfahren	596
Literaturverzeichnis	597
11 Psychoakustische Messtechnik	599
Dr.-Ing. Christian Maschke und Dr.-Ing. André Jakob	
11.1 Einleitung	599
11.2 Warum eine gehörgerechte Messtechnik?	599
11.3 Grundlagen einer gehörgerechten Schallanalyse	600
11.3.1 Hörschwelle	601
11.3.2 Verdeckungseffekte	602
11.3.3 Frequenzgruppen und Erregung	603
11.3.4 Lautstärkewahrnehmung in Abhängigkeit von der Schallereignisdauer	606
11.4 Psychoakustische Kenngrößen elementarer Wahrnehmungskomponenten	607
11.4.1 Kenngrößen der Hörempfindung „Lautstärkewahrnehmung (sound intensity perception)“	607
11.4.1.1 Lautstärkepegel (Loudness level)	607
11.4.1.2 Lautheit (Loudness)	609
11.4.1.3 Lautheit nach Zwicker (Zwicker Loudness)	610
11.4.2 Kenngrößen der Hörempfindung „Tonhöhenwahrnehmung (pitch perception)“	613
11.4.2.1 Verhältnistonhöhe (Ratio Pitch)	613
11.4.2.2 Tonhaltigkeit, Ausgeprägtheit der Tonhöhe (pitch strength)	614
11.4.3 Hörempfindung „Schärfe (sharpness)“	615
11.4.3.1 Berechnung der Schärfe	615
11.4.4 Hörempfindung „Rauhigkeit (Roughness)“	618
11.4.4.1 Berechnung der Rauhigkeit	619
11.4.5 Hörempfindung „Schwankungsstärke (fluctuation strength)“	622
11.4.5.1 Berechnung der Schwankungsstärke	622
11.4.6 Hörempfindung „Klanghaftigkeit (tonality)“	623

11.4.6.1	Berechnung der Klanghaftigkeit	623
11.5	Psychoakustische Kenngrößen komplexer Wahrnehmungskomponenten	625
11.5.1	Lästigkeit, Belästigung (annoyance)	627
11.5.1.1	Unbeeinflusste Lästigkeit (unbiased annoyance)	627
11.5.1.2	Berechnung der unbeeinflussten Lästigkeit	628
11.5.1.3	Psychoakustische Lästigkeit (psychoacoustic annoyance)	629
11.5.1.4	Berechnung der psychoakustischen Lästigkeit	629
11.5.2	Wohlklang (sensory pleasantness)	630
11.5.2.1	Berechnung des sensorischen Wohlklangs	630
11.6	Binaurales Hören	631
11.6.1	Lateralisation (lateralization)	631
11.6.1.1	Interaurale Zeit- und Intensitätseffekte	631
11.6.2	Lokalisation (localization)	632
11.6.2.1	Bewegungen von Kopf und Quelle	633
11.6.2.2	Spektrale Einflüsse des Außenohres	633
11.6.2.3	Azimut, Elevation und Distanz	634
11.6.3	Interaurale Korrelation (interaural correlation)	637
11.6.4	Binaurale Lautheit (binaural loudness)	638
	Literaturverzeichnis	639
12	Messungen in Strömungen	643
	Prof. Dr. Wolfgang Neise	
12.1	Einleitung	643
12.2	Mikrofone und Sensoren für Schall- und instationäre Druckmessungen in Strömungen	645
12.2.1	Mikrofonvorsätze für Schallmessungen bei überlagerter Strömung	645
12.2.2	Sensoren für instationäre Wanddruckmessungen	649
12.2.3	Sondenmikrofone	651
12.2.4	Mikrofonvorsatz zur Unterdrückung der turbulenten Druckschwankungen in einer Kanalströmung	654
12.2.5	Vergleich verschiedener Windschirme	658
12.2.6	Kohärenzverfahren nach Chung [12.15]	659
12.2.7	Bemerkung zur Schnellemessung bei überlagerter Strömung	661
12.3	Grundlagen der Schallausbreitung in Strömungskanälen	661
12.3.1	Schallausbreitung in schallharten Rechteckkanälen mit gleichförmiger Strömungsgeschwindigkeit	663
12.3.2	Schallausbreitung in runden Kanälen mit gleichförmiger Strömungsgeschwindigkeit	667
12.4	Schallleistungsbestimmung in Strömungskanälen	669
12.4.1	Vorbemerkung	669

12.4.2	Beschreibung der grundlegenden akustischen Problematik	670
12.4.2.1	Axiale Stehwellen im Kanal und akustische Belastung	670
12.4.2.2	Höhere akustische Moden bei der Schallausbreitung im Messkanal	672
12.4.2.3	Unterdrückung der turbulenten Druckschwankungen	673
12.4.2.4	Unterscheidung zwischen Schall- und turbulenten Druckschwankungen	675
12.4.3	Beschreibung des genormten Kanalverfahrens ISO 5136 [12.43] für runde Messkanäle	680
12.4.4	Schallleistungsmessungen in Strömungskanälen mit Rechteckquerschnitt	687
12.5	Akustische Modenanalyse in Strömungskanälen	690
12.5.1	Vorbemerkung	690
12.5.2	Entstehung höherer akustischer Moden durch Rotor-Stator- und Rotor-Rotor-Wechselwirkungen	691
12.5.3	Radialmodenanalyse für tonale Schallkomponenten	692
12.5.4	Radialmodenanalyse mit Impuls-Schiebe-Methode	696
12.5.5	Modenanalyseverfahren zur Bestimmung der modalen Schallleistung und der Gesamtschallleistung	699
12.5.6	Modenanalyseverfahren für breitbandige Spektralkomponenten	701
12.6	Messungen hydrodynamischer Druckschwankungen in freien Strömungen	705
12.6.1	Vorbemerkung	705
12.6.2	Messungen hydrodynamischer Druckschwankungen im Freistrahler	705
12.6.3	Messungen hydrodynamischer Druckschwankungen in turbulentter Rohrströmung	706
	Literaturverzeichnis	708
	Sachverzeichnis	713