

Inhaltsverzeichnis

1	Schwingungen: Zeitfunktionen und Spektren	1
1.1	Was ist eine Schwingung?	1
1.2	Die Sinusschwingung	4
1.2.1	Zeigerdarstellung der Sinusschwingung	5
1.3	Frequenz	5
1.3.1	Frequenzbereiche mechanischer Schwingungen	5
1.3.2	Frequenzbereiche elektromagnetischer Schwingungen	8
1.3.3	Frequenzbandbreite und Frequenzkonstanz	10
1.3.4	Frequenz und Sequenz, Mäanderfunktionen	18
1.4	Amplitude	20
1.5	Frequenz und Amplitude in der psychologischen Akustik	26
1.6	Komplexe Darstellung von Sinusschwingungen	27
1.7	Fourieranalyse periodischer Schwingungen	33
1.7.1	Fourierkoeffizienten in reeller und komplexer Darstellung	33
1.7.2	Bedeutung der Fourieranalyse	36
1.7.3	Experimentelle Durchführung der Fourieranalyse	38
1.8	Periodische Schwingungen	40
1.8.1	Spezielle Schwingungsformen	42
1.8.1.1	Symmetrische Rechteckschwingung	42
1.8.1.2	Symmetrische Dreieckschwingung	45
1.8.1.3	Sägezahnschwingungen	45
1.8.1.4	Impulsfolgen (Pulse)	47
1.8.1.5	Abtasttheorem	50
1.8.1.6	Natürliche Klangspektren	54
1.8.1.7	Lineare Superposition von Sinusschwingungen	57
1.8.2	Nichtlineare Verzerrungen	63
1.8.3	Modulierte Schwingungen	65
1.8.3.1	Amplitudenmodulation	66
1.8.3.2	Frequenz- und Phasenmodulation	72
1.8.4	Lissajousfiguren	81

1.9	Fourierintegral und Fouriertransformation	82
1.9.1	Reelle Fourierintegraldarstellung	82
1.9.2	Komplexe Fourierintegraldarstellung, Fouriertransformation . . .	84
1.9.3	Rechenregeln der Fouriertransformation	87
1.9.4	Parseval'sches Theorem. Spektrale Energie- und Leistungsdichte	90
1.9.5	Experimentelle Durchführung der Fourieranalyse unperiodischer Zeitfunktionen	93
1.9.6	Räumliche Fouriertransformation	94
1.10	Laplacetransformation	97
1.10.1	Übergang von der Fouriertransformation zur Laplacetransformation	97
1.10.2	Rechenregeln der Laplacetransformation	99
1.11	Unperiodische Vorgänge	101
1.11.1	Spezielle einmalige Vorgänge	102
1.11.1.1	Rechteckimpuls	102
1.11.1.2	δ -Impuls	103
1.11.1.3	Sprung- und Übergangsfunktion	105
1.11.1.4	Gaußimpuls und Exponentialimpuls	108
1.11.1.5	Sägezahnimpuls, Überschallknall	110
1.11.1.6	Schwingungsimpulse	112
1.11.1.7	Impulskompression	114
1.11.2	Unschärferelation	115
1.11.3	Rauschen	118
1.11.3.1	Beispiele für Rauschvorgänge	118
1.11.3.2	Rauschgeneratoren	121
1.11.3.3	Statistische Beschreibung von Rauschsignalen	124
1.11.3.4	Anzeigeschwankungen bei der Messung von Rauschsignalen	132
1.12	Korrelation	135
1.12.1	Korrelationsfaktor und Korrelationskoeffizient, Lock-in-Verstärker	135
1.12.2	Autokorrelationsanalyse	140
1.12.2.1	Autokorrelationsfunktion	140
1.12.2.2	Wiener'scher Satz	145
1.12.2.3	Autokorrelationsfunktion von Rauschsignalen	148
1.12.2.4	Störbefreiung durch Autokorrelationsanalyse, synchrone Mittelung und Korrelationsfilter (Matched Filter)	159
1.12.2.5	Experimentelle Durchführung der Autokorrelationsanalyse	165
1.12.2.6	Impulsanalyse durch Autokorrelation	167

1.12.3	Kreuzkorrelationsanalyse	170
1.12.3.1	Kreuzkorrelationsfunktion und Kreuzleistungsspektrum	170
1.12.3.2	Laufzeitanalyse durch Kreuzkorrelation	173
1.12.3.3	Kreuzkorrelationsmessungen in der subjektiven Akustik	173
1.12.3.4	Systemanalyse durch Kreuzkorrelation	174
1.12.3.5	Wiener'sches Optimalfilter, Prädiktionsfilter	177
1.12.3.6	Räumliche Korrelation	185
1.12.4	Kohärenzfunktion und Strukturfunktion	188
1.12.4.1	Kohärenzfunktion	188
1.12.4.2	Strukturfunktion	191
1.13	Hilbert-Transformation, analytisches Signal	194
1.13.1	Analytisches Signal (Präenvelope)	194
1.13.2	Hilbert-Transformation	196
1.13.3	Momentanfrequenz und Einhüllende	197
1.13.4	Kramers-Kronig-Beziehungen	199
1.14	Digitale Signalverarbeitung	203
1.14.1	Analog-Digital-Umsetzung	204
1.14.2	Digitale Fouriertransformation	205
1.14.2.1	Diskrete Fouriertransformation (DFT)	205
1.14.2.2	Schnelle Fouriertransformation (FFT)	211
1.14.2.3	Zeitfenster	216
1.14.3	Hadamard- und Haar-Transformation	220
1.15	z-Transformation	225
	Literatur	227
2	Einfache lineare Schwingungssysteme	233
2.1	Grundelemente	233
2.2	Impedanz und Admittanz	236
2.3	Mechanischer Parallelresonanzkreis und elektrischer Serienresonanzkreis	241
2.3.1	Freie Schwingungen	242
2.3.1.1	Eigenschwingungen des elektrischen Serienkreises	242
2.3.1.2	Eigenschwingungen des mechanischen Parallelkreises	244
2.3.1.3	Dämpfungsparameter	245
2.3.2	Erzwungene Schwingungen	246
2.3.2.1	Impedanzdiagramme	246
2.3.2.2	Admittanzdiagramme	249
2.3.2.3	Schnelle- und Stromresonanzkurven	251
2.3.2.4	Elongationsresonanzkurven	260
2.3.2.5	Beschleunigungsresonanzkurven	266
2.4	Materialdämpfung	268
2.4.1	Komplexe mechanische Moduln	270
2.4.2	Komplexe Dielektrizitäts- und Permeabilitätszahl	276

2.4.3	Relaxationsmodelle	279
2.4.3.1	Voigt–Kelvin–Modell und Maxwell–Modell	279
2.4.3.2	Mechanische „Drei-Parameter“-Relaxationsmodelle	282
2.4.3.3	Elektrische Relaxationsmodelle	286
2.4.3.4	Resonanz und Relaxation als Ursachen für Dispersion und Absorption	290
2.4.4	Zeitbereichsreflektometrie und -spektrometrie	295
2.5	Elektrischer Parallelresonanzkreis und mechanischer Serienresonanzkreis	301
2.6	Dualität und elektrisch–mechanische Analogien	304
2.6.1	Dualität (Widerstandsreziprozität)	304
2.6.1.1	Duale elektrische Schaltungen	304
2.6.1.2	Massen als Schaltelemente	308
2.6.1.3	Duale mechanische Systeme	309
2.6.1.4	Elektrisch–mechanische Analogien	310
2.7	Erschütterungsisolierung	313
2.7.1	Erschütterungsisolierung durch einfache federnde Lagerung	313
2.7.1.1	Geschwindigkeitsproportionale (viskose) Dämpfung	313
2.7.1.2	Dämpfung durch viskoelastische Feder	317
2.7.2	Erschütterungsisolierung mit Hilffsystem („dynamischer Absorber“)	319
2.8	Spezielle Masse–Feder–Systeme	322
2.8.1	Tieffrequente Pendel	323
2.8.2	Tonpilz	326
2.8.3	Helmholtzresonator und Tonraum	328
2.8.4	Reduktion einer schwingenden Membran auf ein Masse–Feder–System	330
2.8.5	Schwingförderer	333
	Literatur	335
3	Elektromechanische Wandler	337
3.1	Vorbemerkung	337
3.2	Elektrodynamische Wandler	338
3.3	Piezoelektrische Wandler	344
3.4	Dielektrische Wandler	355
3.5	Elektromagnetische Wandler	359
3.6	Magnetostriktive Wandler	364
3.7	Sende- und Empfangseigenschaften der elektroakustischen Wandler	366

3.8	Messung mechanischer Impedanzen	368
3.8.1	Elektrodynamisches Vibrometer	368
3.8.2	Piezoelektrischer Impedanzmesskopf	369
3.9	Transformator und Gyrator	371
3.9.1	Vierpoldarstellungen	371
3.9.2	Praktische Beispiele	374
	Literatur	378
4	Gekoppelte Schwingungssysteme	379
4.1	Zwei gekoppelte Schwingkreise	379
4.1.1	Freie Schwingungen	382
4.1.1.1	Gekoppelte Schwingkreise	382
4.1.1.2	Quantenmechanisches Analogon	385
4.1.2	Kopplungsarten	386
4.1.3	Erzwungene Schwingungen	388
4.2	Mehrkreisfilter und Ketten	394
4.2.1	Tiefpass und Hochpass	397
4.2.2	Bandfilter	402
4.3	Kontinuierliche Schwingungssysteme	408
4.3.1	Übergang vom Tiefpass zum eindimensionalen Kontinuum	408
4.3.2	Eigenschwingungen eindimensionaler Kontinua	413
4.3.3	Resonanzkurven eindimensionaler Kontinua	417
4.3.4	Zwei- und dreidimensionale kontinuierliche Schwingungssysteme	427
4.3.5	Schwingungsberechnung bei komplexeren Strukturen	430
4.3.6	Modalanalyse	431
4.3.7	Laser-Doppler-Vibrometer (LDV)	431
4.4	Einschwingvorgänge	432
4.4.1	Einschwingvorgänge in einfachen Resonanzkreisen	433
4.4.2	Einschwingvorgänge in Filtern	436
4.4.2.1	Einschwingvorgänge in Tiefpässen	436
4.4.2.2	Einschwingvorgänge in Bandfiltern	439
4.4.2.3	Übertragung von Schwingungsimpulsen durch Bandfilter	442
4.4.2.4	Einschwingvorgänge in Analysatoren	443
4.4.3	Einschwingvorgänge auf Leitungen	444
4.4.4	Einschwingvorgänge bei Spektralglittern	446
4.4.5	Berechnung von Einschwingvorgängen mithilfe der Laplacetransformation	447
	Literatur	450

5	Nichtlineare und parametrische Systeme	453
5.1	Vorbemerkung	453
5.2	Selbsterregung, Ziehen und Mitnahme	455
5.2.1	Selbsterregte Schwingungen	455
5.2.2	Phasendiagramm	459
5.2.3	Zieherscheinungen	465
5.2.4	Mitnahme	467
5.2.4.1	Mitnahme von Schwingungsgeneratoren	467
5.2.4.2	Mitnahme in Organismen, Phasenresponse-Kurven	471
5.2.5	Regelschwingungen	474
5.3	Freie Schwingungen in passiven nichtlinearen Systemen	475
5.3.1	Schwerependel bei großen Schwingungsamplituden	475
5.3.2	Transversal schwingende Saite	480
5.3.3	Pulsationsschwingungen von Gasblasen in Flüssigkeiten	485
5.4	Erzwungene Schwingungen in passiven nichtlinearen Systemen	491
5.4.1	Resonanzkurven des Schwerependels	491
5.4.2	Resonanzkurven der transversal schwingenden Saite und verwandter nichtlinearer Systeme	497
5.4.3	Frequenzumsetzung in nichtlinearen Resonanzsystemen	502
5.4.4	Erzwungene Blasenschwingungen	503
5.4.5	Nichtlineare Wellenausbreitung	507
5.4.5.1	Nichtlineare Optik	507
5.4.5.2	Phonon-Phonon-Wechselwirkung	510
5.4.5.3	Aufsteilung der Wellenfront	510
5.4.5.4	Solitonen	511
5.5	Parametrische (rheolineare) Schwingungen	511
5.5.1	Hill'sche Differenzialgleichung	513
5.5.2	Mathieu'sche Differenzialgleichung	515
5.5.2.1	Parametrische Erregung der Subharmonischen	518
5.5.2.2	Strutt'sche Karte, Stehpendel	520
5.5.3	Parametrischer Verstärker	523
5.5.3.1	Einfache parametrische Verstärker	524
5.5.3.2	Parametrische Verstärker mit Idlerkreis	525
	Literatur	534
6	Aktive Schwingungs- und Schallbeeinflussung	537
6.1	Vorbemerkung	537
6.2	Aktive Schwingungsdämpfung	538
6.2.1	Frühe Anwendungen	538
6.2.2	Aktive Dämpfung von Stab-, Platten- und Strukturschwingungen	538
6.2.3	Adaptive („intelligente“) Strukturen und Materialien	541
6.2.4	Aktive Schwingungsisolierung	545

6.2.5	Bauwerke	547
6.2.6	Aktive und Adaptive Optik	549
6.2.7	Lärminderung durch aktive Körperschallbeeinflussung	550
6.2.8	Aktive Verbesserung der Schallisolation	551
6.2.9	Aktive Kontrolle nichtlinearer dynamischer Systeme	552
6.2.10	Aktive Strömungsbeeinflussung	554
6.3	Aktive Schallfeldbeeinflussung	555
6.3.1	Eindimensionale Schallausbreitung	555
6.3.2	LMS-Algorithmus	560
6.3.3	Der Energie-Einwand	562
6.3.4	Hüllflächenverfahren (JMC-Theorie)	563
6.3.5	Wechselwirkung von Primär- und Sekundärquellen	564
6.3.6	Kleine Volumina — persönlicher Schallschutz	566
6.3.7	Globale und lokale Schallkompensation	567
6.3.8	Dreidimensionale Schallfelder in Innenräumen	569
6.3.9	Freifeld-Anwendungen der Aktiven Lärminderung	572
6.4	Schlussbemerkung	573
	Literatur	573
	Sach- und Personenregister	597