

Inhaltsverzeichnis

1.	Schwingungen: Zeitfunktionen und Spektren	1
1.1.	Definition einer Schwingung	1
1.2.	Die Sinusschwingung	3
1.2.1.	Zeigerdarstellung der Sinusschwingung	3
1.2.2.	Frequenz	4
1.2.2.1.	Frequenzbereiche mechanischer Schwingungen	4
1.2.2.2.	Frequenzbereiche elektromagnetischer Schwingungen	7
1.2.2.3.	Frequenzbandbreite und Frequenzkonstanz	9
1.2.2.4.	Frequenz und Sequenz	13
1.2.3.	Amplitude	14
1.2.3.1.	Definitionen	14
1.2.3.2.	Logarithmische Skalen	16
1.2.4.	Frequenz und Amplitude in der psychologischen Akustik	20
1.2.5.	Komplexe Darstellung von Sinusschwingungen	20
1.3.	Periodische Schwingungen	25
1.3.1.	Fourieranalyse periodischer Schwingungen	27
1.3.1.1.	Fourierkoeffizienten in reeller und komplexer Darstellung	27
1.3.1.2.	Bedeutung der Fourieranalyse	30
1.3.1.3.	Experimentelle Durchführung der Fourieranalyse	32
1.3.2.	Symmetrische Rechteckschwingung	34
1.3.2.1.	Spektrum der symmetrischen Rechteckschwingung	34
1.3.2.2.	Systemuntersuchung mit Rechteckschwingungen	35
1.3.2.3.	Gibbssches Phänomen	36
1.3.3.	Symmetrische Dreieckschwingung	37
1.3.4.	Sägezahnschwingungen	38
1.3.4.1.	Spektren der fallenden und steigenden Sägezahnschwingung	38
1.3.4.2.	Anwendungen von Sägezahnschwingungen	39
1.3.5.	Impulsfolgen (Pulse)	40
1.3.5.1.	Rechteckimpulsfolge	40
1.3.5.2.	δ -Impulsfolge	41
1.3.5.3.	Abtasttheorem	43
1.3.6.	Natürliche Klangspektren	45
1.3.6.1.	Klangspektren von Musikinstrumenten	45
1.3.6.2.	Cepstrum	47
1.3.7.	Lineare Superposition von Sinusschwingungen	48
1.3.7.1.	Addition zweier Sinusschwingungen	48
1.3.7.2.	Schwebungen	49
1.3.8.	Nichtlineare Verzerrungen	52
1.3.8.1.	Klirrfaktor	53
1.3.8.2.	Kombinationsfrequenzen	53
1.3.9.	Modulierte Schwingungen	56
1.3.9.1.	Amplitudenmodulation	57
1.3.9.2.	Frequenz- und Phasenmodulation	60
1.3.10.	Lissajousfiguren	69
1.4.	Unperiodische Vorgänge	70
1.4.1.	Fourierintegral und Fouriertransformation	70
1.4.1.1.	Reelle Fourierintegraldarstellung	70

1.4.1.2.	Komplexe Fourierintegraldarstellung, Fouriertransformation	72
1.4.1.3.	Rechenregeln der Fouriertransformation	75
1.4.1.4.	Parsevalsches Theorem. Spektrale Energie- und Leistungsdichte	76
1.4.1.5.	Experimentelle Durchführung der Fourieranalyse unperiodischer Zeitfunktionen	78
1.4.1.6.	Räumliche Fouriertransformation	79
1.4.2.	Spezielle einmalige Vorgänge	81
1.4.2.1.	Rechteckimpuls	82
1.4.2.2.	δ -Impuls	83
1.4.2.3.	Sprung- und Übergangsfunktion	85
1.4.2.4.	Gaußimpuls und Exponentialimpuls	88
1.4.2.5.	Sägezahnimpuls, Überschallknall	90
1.4.2.6.	Schwingungsimpulse	91
1.4.2.7.	Impulskompression	92
1.4.3.	Unschärferelation	94
1.4.4.	Rauschen	96
1.4.4.1.	Beispiele für Rauschvorgänge	96
1.4.4.2.	Rauschgeneratoren	98
1.4.4.3.	Statistische Beschreibung von Rauschsignalen	100
1.4.4.4.	Anzeigeschwankungen bei der Messung von Rauschsignalen	104
1.5.	Korrelation	108
1.5.1.	Korrelationsfaktor und Korrelationskoeffizient	108
1.5.2.	Autokorrelationsanalyse	111
1.5.2.1.	Autokorrelationsfunktion	111
1.5.2.2.	Wienerscher Satz	113
1.5.2.3.	Autokorrelationsfunktion von Rauschsignalen	116
1.5.2.4.	Störfreiung durch Autokorrelationsanalyse und Signalmittelwertbildung	123
1.5.2.5.	Experimentelle Durchführung der Autokorrelationsanalyse	124
1.5.2.6.	Impulsanalyse durch Autokorrelation	127
1.5.3.	Kreuzkorrelationsanalyse	129
1.5.3.1.	Kreuzkorrelationsfunktion	129
1.5.3.2.	Laufzeitanalyse durch Kreuzkorrelation	131
1.5.3.3.	Kreuzkorrelationsmessungen in der subjektiven Akustik	133
1.5.3.4.	Systemanalyse durch Kreuzkorrelation	134
1.5.3.5.	Räumliche Korrelation	136
1.6.	Hilbert-Transformation und analytisches Signal	138
1.6.1.	Analytisches Signal	138
1.6.2.	Hilbert-Transformation	140
1.6.3.	Momentanfrequenz und Einhüllende	141
1.6.4.	Kramers-Kronig-Beziehungen	142
2.	Einfache lineare Schwingungssysteme	145
2.1.	Grundelemente	145
2.2.	Impedanz und Admittanz	147
2.3.	Mechanischer Parallelresonanzkreis und elektrischer Serienresonanzkreis	150
2.3.1.	Freie Schwingungen	152
2.3.1.1.	Eigenschwingungen des elektrischen Serienkreises	152
2.3.1.2.	Eigenschwingungen des mechanischen Parallelkreises	154
2.3.1.3.	Dämpfungsparameter	155
2.3.1.4.	Demonstration freier Schwingungen	156

2.3.2.	Erzwungene Schwingungen	158
2.3.2.1.	Impedanzdiagramme	158
2.3.2.2.	Admittanzdiagramme	160
2.3.2.3.	Experimentelle Aufnahme der Ortskurven von Impedanz und Admittanz	162
2.3.2.4.	Schnelle- und Stromresonanzkurven	165
2.3.2.5.	Elongationsresonanzkurven	172
2.3.2.6.	Beschleunigungsresonanzkurven	176
2.3.2.7.	Demonstration von Resonanzkurven	178
2.4.	Materialdämpfung	179
2.4.1.	Komplexe mechanische Moduln	181
2.4.2.	Komplexe Dielektrizitäts- und Permeabilitätszahl	188
2.4.3.	Relaxationsmodelle	191
2.4.3.1.	Voigt-Kelvin-Modell und Maxwell-Modell	191
2.4.3.2.	Mechanische „Drei-Parameter“-Relaxationsmodelle	194
2.4.3.3.	Elektrische Relaxationsmodelle	197
2.4.3.4.	Resonanz und Relaxation als Ursachen für Dispersion und Absorption	202
2.5.	Elektrischer Parallelresonanzkreis und mechanischer Serienresonanzkreis	205
2.6.	Dualität und elektrisch-mechanische Analogien	209
2.6.1.	Dualität (Widerstandsreziprozität)	209
2.6.1.1.	Duale elektrische Schaltungen	209
2.6.1.2.	Massen als Schaltelemente	213
2.6.1.3.	Duale mechanische Systeme	213
2.6.2.	Elektrisch-mechanische Analogien	214
2.7.	Erschütterungsisolierung	217
2.7.1.	Erschütterungsisolierung durch einfache federnde Lagerung	217
2.7.1.1.	Geschwindigkeitsproportionale (viskose) Dämpfung	217
2.7.1.2.	Dämpfung durch viskoelastische Feder	221
2.7.2.	Erschütterungsisolierung mit Hilffsystem („Dynamischer Absorber“)	223
2.8.	Spezielle Masse-Feder-Systeme	227
2.8.1.	Tieffrequente Pendel	227
2.8.2.	Tonpilz	231
2.8.3.	Helmholtzresonator und Tonraum	233
2.8.4.	Reduktion einer schwingenden Membran auf ein Masse-Feder-System	235
2.8.5.	Schwingförderer	238
3.	Elektromechanische Wandler	241
3.1.	Elektrodynamische Wandler	241
3.2.	Piezoelektrische Wandler	248
3.3.	Dielektrische Wandler	258
3.4.	Elektromagnetische Wandler	262
3.5.	Magnetostriktive Wandler	267
3.6.	Sende- und Empfangseigenschaften der elektroakustischen Wandler	269
3.7.	Messung mechanischer Impedanzen	271
3.7.1.	Vibrometer	271
3.7.2.	Piezoelektrischer Impedanzmeßkopf	273
3.8.	Transformator und Gyrator	275
3.8.1.	Vierpoldarstellungen	275
3.8.2.	Praktische Beispiele	277

4.	Gekoppelte Schwingungssysteme	283
4.1.	Zwei gekoppelte Schwingkreise	283
4.1.1.	Freie Schwingungen	286
4.1.1.1.	Gekoppelte Schwingkreise	286
4.1.1.2.	Quantenmechanisches Analogon	292
4.1.2.	Kopplungsarten	294
4.1.3.	Erzwungene Schwingungen	295
4.2.	Mehrkreisfilter und Ketten	304
4.2.1.	Tiefpaß und Hochpaß	307
4.2.2.	Bandfilter	313
4.3.	Kontinuierliche Schwingungssysteme	321
4.3.1.	Übergang vom Tiefpaß zum eindimensionalen Kontinuum	321
4.3.2.	Eigenschwingungen eindimensionaler Kontinua	326
4.3.3.	Resonanzkurven eindimensionaler Kontinua	329
4.3.4.	Zwei- und dreidimensionale kontinuierliche Schwingungssysteme	339
4.4.	Einschwingvorgänge	342
4.4.1.	Einschwingvorgänge in einfachen Resonanzkreisen	344
4.4.2.	Einschwingvorgänge in Filtern	346
4.4.2.1.	Einschwingvorgänge in Tiefpässen	347
4.4.2.2.	Einschwingvorgänge in Bandfiltern	349
4.4.2.3.	Übertragung von Schwingungsimpulsen durch Bandfilter	354
4.4.2.4.	Einschwingvorgänge in Analysatoren	356
4.4.3.	Einschwingvorgänge auf Leitungen	357
4.4.4.	Einschwingvorgänge bei Spektralgittern	359
4.4.5.	Laplace-Transformation	361
4.4.5.1.	Übergang von der Fourier-Transformation zur Laplace-Transformation	362
4.4.5.2.	Rechenregeln der Laplace-Transformation	364
4.4.5.3.	Berechnung von Einschwingvorgängen mit Hilfe der Laplace-Transformation	366
5.	Nichtlineare und rheolineare Schwingungssysteme	369
5.1.	Selbsterregung, Ziehen und Mitnahme	370
5.1.1.	Selbsterregte Schwingungen	370
5.1.2.	Phasendiagramm	374
5.1.3.	Zieherscheinungen	379
5.1.4.	Mitnahme	381
5.1.4.1.	Mitnahme von Schwingungsgeneratoren	381
5.1.4.2.	Mitnahme in Organismen. Phasenresponsekurven	386
5.1.4.3.	Anwendung des Analogrechners bei Schwingungsuntersuchungen	389
5.2.	Freie Schwingungen in passiven nichtlinearen Systemen	391
5.2.1.	Schwerependel bei großen Schwingungsamplituden	391
5.2.2.	Transversal schwingende Saite	396
5.2.3.	Pulsationsschwingungen von Gasblasen in Flüssigkeiten	401
5.3.	Erzwungene Schwingungen in passiven nichtlinearen Systemen	405
5.3.1.	Resonanzkurven des Schwerependels	405
5.3.2.	Resonanzkurven der transversal schwingenden Saite und verwandter nichtlinearer Systeme	412
5.3.3.	Frequenzumsetzung in nichtlinearen Resonanzsystemen	420
5.3.4.	Erzwungene Blasenschwingungen	422
5.3.5.	Nichtlineare Wellenausbreitung	425

5.3.5.1.	Nichtlineare Optik	425
5.3.5.2.	Phonon-Phonon-Wechselwirkung	428
5.3.5.3.	Aufsteilung der Wellenfront	429
5.4.	Rheolineare Schwingungen	430
5.4.1.	Hillsche Differentialgleichung	432
5.4.2.	Mathieusche Differentialgleichung	434
5.4.2.1.	Parametrische Erregung der Subharmonischen	435
5.4.2.2.	Struttsche Karte. Stehpendel	439
5.4.3.	Parametrische Verstärker	443
5.4.3.1.	Einfache parametrische Verstärker	444
5.4.3.2.	Parametrische Verstärker mit Idlerkreis	447

Literatur	458
------------------	------------

Sachwortverzeichnis	462
----------------------------	------------