

# Inhaltsverzeichnis

|           |   |          |
|-----------|---|----------|
| <b>1.</b> | <b>Schwingungen: Zeitfunktionen und Spektren</b>          | <b>1</b> |
| 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.  | $\delta$ -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       |

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

|               |   |     |
|---------------|---|-----|
| <b>2.3.2.</b> | <b>Erzwungene Schwingungen</b>  | 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 Hilfssystem („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 |
| <b>3.</b>     | <b>Elektromechanische Wandler</b>                                       | 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.          | Senden- 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 Gyror   | 275 |
| 3.8.1.        | Vierpoldarstellungen  | 275 |
| 3.8.2.        | Praktische Beispiele  | 277 |

|   |     |
|---|-----|
| <b>4. Gekoppelte Schwingungssysteme</b>   | 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 Tiefpassen   | 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 Fouriertransformation 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 |
| <b>5. Nichtlineare und rheolineare Schwingungssysteme</b>                                     | 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 |
| <b>Literatur</b>           |  | 458 |
| <b>Sachwortverzeichnis</b> |  | 462 |