

# Inhaltsverzeichnis

|          |                                                             |           |
|----------|-------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>Einleitung</b> .....                                     | <b>1</b>  |
| <b>2</b> | <b>Grundbegriffe</b> .....                                  | <b>5</b>  |
| 2.1      | Elektrische Ladung .....                                    | 5         |
| 2.2      | Aufbau eines Atom .....                                     | 7         |
| 2.3      | Elektrischer Strom .....                                    | 8         |
| 2.4      | Elektrische Spannung .....                                  | 10        |
| 2.5      | Widerstand .....                                            | 12        |
| 2.6      | Widerstand eines Leiters .....                              | 13        |
| 2.7      | Temperaturabhängigkeit des Widerstands .....                | 15        |
| 2.8      | Energie und Leistung .....                                  | 15        |
| <b>3</b> | <b>Grundgesetze</b> .....                                   | <b>17</b> |
| 3.1      | Knotenregel (1. Kirchhoffsches Gesetz) .....                | 17        |
| 3.2      | Maschenregel (2. Kirchhoffsches Gesetz) .....               | 18        |
| 3.3      | Reihenschaltung von Widerständen .....                      | 20        |
| 3.4      | Spannungsteiler .....                                       | 22        |
| 3.5      | Parallelschaltung von Widerständen .....                    | 23        |
| 3.6      | Stromteiler .....                                           | 25        |
| 3.7      | Spannungsmessung .....                                      | 26        |
| 3.8      | Strommessung .....                                          | 28        |
| <b>4</b> | <b>Lineare Zweipole</b> .....                               | <b>31</b> |
| 4.1      | Generator- und Verbraucher-Zählpfeilsystem .....            | 31        |
| 4.2      | Ideale Spannungsquelle .....                                | 32        |
| 4.3      | Reale Spannungsquelle .....                                 | 33        |
| 4.4      | Ideale Stromquelle .....                                    | 36        |
| 4.5      | Reale Stromquelle .....                                     | 36        |
| 4.6      | Umwandlung zwischen realer Spannungs- und Stromquelle ..... | 38        |
| 4.7      | Quellen-Ersatzzweipole .....                                | 39        |
| 4.8      | Wirkungsgrad .....                                          | 41        |

|          |                                                                              |            |
|----------|------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 4.9      | Leistungsanpassung . . . . .                                                 | 42         |
| 4.10     | Messung von Widerständen . . . . .                                           | 44         |
| 4.11     | Linearität . . . . .                                                         | 46         |
| 4.12     | Superpositionsprinzip (Überlagerungsprinzip) . . . . .                       | 48         |
| 4.13     | Bestimmung des Innenwiderstands eines Zweipols . . . . .                     | 51         |
| 4.14     | Belasteter Zweipol: Graphische Lösung . . . . .                              | 54         |
| 4.15     | Nichtlineare Zweipole . . . . .                                              | 56         |
| <b>5</b> | <b>Umwandlungen . . . . .</b>                                                | <b>61</b>  |
| 5.1      | Stern-Dreieck-Umwandlung . . . . .                                           | 61         |
| 5.2      | Vor- und Nachteile der Netzumwandlung . . . . .                              | 64         |
| 5.3      | Spannungsquellenverschiebung . . . . .                                       | 65         |
| 5.4      | Stromquellenverschiebung . . . . .                                           | 67         |
| <b>6</b> | <b>Systematische Verfahren zur Analyse von linearen Netzwerken . . . . .</b> | <b>71</b>  |
| 6.1      | Zweigstromanalyse . . . . .                                                  | 72         |
| 6.2      | Maschenstromanalyse . . . . .                                                | 75         |
| 6.2.1    | Behandlung von Stromquellen . . . . .                                        | 83         |
| 6.3      | Knotenpotentialanalyse . . . . .                                             | 89         |
| 6.3.1    | Behandlung von Spannungsquellen . . . . .                                    | 94         |
| <b>7</b> | <b>Zeitabhängige Größen . . . . .</b>                                        | <b>97</b>  |
| 7.1      | Periodische Größen . . . . .                                                 | 98         |
| 7.2      | Mittelwert einer Funktion . . . . .                                          | 99         |
| 7.3      | Bestimmtes Integral . . . . .                                                | 101        |
| 7.4      | Gleichrichtung . . . . .                                                     | 102        |
| 7.5      | Einweg-Gleichrichtwert . . . . .                                             | 104        |
| 7.6      | Gleichrichtmittelwert . . . . .                                              | 104        |
| 7.7      | Mittelwert der Leistung . . . . .                                            | 105        |
| 7.8      | Effektivwert . . . . .                                                       | 106        |
| 7.9      | Zusammenfassung: Mittelwerte periodischer Funktionen . . . . .               | 107        |
| 7.10     | Scheitel- und Formfaktor . . . . .                                           | 108        |
| 7.11     | Sinusförmige Spannungen und Ströme . . . . .                                 | 108        |
| 7.12     | Messen von Wechselgrößen . . . . .                                           | 113        |
| 7.12.1   | Drehspulinstrument . . . . .                                                 | 113        |
| 7.12.2   | Dreheiseninstrument . . . . .                                                | 114        |
| 7.12.3   | Echte Effektivwertmessung (True RMS) . . . . .                               | 114        |
| <b>8</b> | <b>Elementare Zweipole . . . . .</b>                                         | <b>117</b> |
| 8.1      | Definitionen . . . . .                                                       | 117        |
| 8.1.1    | Ohmscher Widerstand . . . . .                                                | 117        |
| 8.1.2    | Induktivität . . . . .                                                       | 118        |
| 8.1.3    | Kapazität . . . . .                                                          | 119        |

|           |                                                                                  |            |
|-----------|----------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 8.2       | Verhalten bei sinusförmigen Spannungen und Strömen .....                         | 120        |
| 8.2.1     | Ohmscher Widerstand .....                                                        | 120        |
| 8.2.2     | Induktivität .....                                                               | 122        |
| 8.2.3     | Kapazität .....                                                                  | 123        |
| <b>9</b>  | <b>Lineare Netzwerke mit sinusförmiger Anregung .....</b>                        | <b>127</b> |
| 9.1       | Grundgesetze .....                                                               | 127        |
| 9.2       | Prinzip der komplexen Wechselstromrechnung .....                                 | 129        |
| 9.3       | Komplexer Effektivwert einer sinusförmiger Grösse .....                          | 130        |
| 9.4       | Operationen .....                                                                | 132        |
| 9.4.1     | Addition zweier sinusförmigen Grössen .....                                      | 132        |
| 9.4.2     | Multiplikation einer sinusförmigen Grösse mit einer<br>Konstanten .....          | 136        |
| 9.4.3     | Ableiten einer sinusförmigen Grösse nach der Zeit .....                          | 137        |
| 9.4.4     | Integration einer sinusförmigen Grösse über die Zeit .....                       | 137        |
| 9.4.5     | Zusammenfassung .....                                                            | 138        |
| 9.5       | Die Kirchhoff'schen Gesetze in komplexer Form .....                              | 138        |
| 9.6       | Ohmsches Gesetz in komplexer Form .....                                          | 141        |
| 9.7       | Definitionsgleichung der Induktivität in komplexer Form .....                    | 141        |
| 9.8       | Definitionsgleichung der Kapazität in komplexer Form .....                       | 142        |
| 9.9       | Analyse linearer Netzwerke mit Hilfe der komplexen<br>Wechselstromrechnung ..... | 143        |
| 9.10      | Bezeichnungen .....                                                              | 146        |
| 9.11      | Leistungen in Wechselstromnetzwerken .....                                       | 146        |
| <b>10</b> | <b>Resonanzerscheinungen .....</b>                                               | <b>151</b> |
| 10.1      | Reihenschwingkreis .....                                                         | 151        |
| 10.2      | Parallelschwingkreis .....                                                       | 153        |
| 10.3      | Gütefaktor .....                                                                 | 155        |
| 10.3.1    | Reihenschwingkreis .....                                                         | 155        |
| 10.3.2    | Parallelschwingkreis .....                                                       | 155        |
| 10.4      | Allgemeine Definition des Gütefaktors .....                                      | 156        |
| 10.5      | Übertragungsverhalten .....                                                      | 157        |
| <b>11</b> | <b>Mehrphasensysteme .....</b>                                                   | <b>161</b> |
| 11.1      | Motivation .....                                                                 | 161        |
| 11.2      | Drehstromsystem .....                                                            | 162        |
| 11.2.1    | Definition .....                                                                 | 162        |
| 11.3      | Drehstromverbraucher .....                                                       | 165        |
| 11.3.1    | Verbraucher in Dreieckschaltung .....                                            | 165        |
| 11.3.2    | Symmetrische Dreieckslast .....                                                  | 166        |
| 11.3.3    | Verbraucher in Sternschaltung .....                                              | 167        |
| 11.3.4    | Symmetrische Sternlast .....                                                     | 169        |

|           |                                                                                     |     |
|-----------|-------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 11.4      | Leistungen im Drehstromsystem . . . . .                                             | 169 |
| 11.4.1    | Zeitliche Konstanz der Leistung in einem symmetrischen<br>Drehstromsystem . . . . . | 169 |
| 11.4.2    | Elektrodynamische Wattmeter . . . . .                                               | 170 |
| 11.4.3    | Leistungen im symmetrischen Dreiphasensystem . . . . .                              | 171 |
| 11.4.4    | Leistungsmessung bei unsymmetrischem Verbraucher . . . . .                          | 173 |
| <b>12</b> | <b>Ortskurven</b> . . . . .                                                         | 177 |
| 12.1      | Beispiel . . . . .                                                                  | 177 |
| 12.2      | Inversion von Ortskurve . . . . .                                                   | 179 |
| 12.3      | Ortskurven einfacher Schaltungen . . . . .                                          | 180 |
| 12.4      | Beispiel einer komplexeren Ortskurve . . . . .                                      | 181 |
| 12.5      | Konstruktion einer Frequenzskala . . . . .                                          | 184 |
| <b>13</b> | <b>Komplexer Frequenzgang und Bodediagramm</b> . . . . .                            | 189 |
| 13.1      | Komplexer Frequenzgang . . . . .                                                    | 189 |
| 13.2      | Bodediagramm . . . . .                                                              | 191 |
| 13.3      | Beispiele einfacher Bodediagramme . . . . .                                         | 195 |
| 13.4      | Kaskadierung von Übertragungselementen . . . . .                                    | 198 |
| 13.5      | Tipps und Tricks . . . . .                                                          | 201 |
| 13.5.1    | Bestimmung von Betrag und Phase . . . . .                                           | 201 |
| 13.5.2    | Asymptotisches Verhalten . . . . .                                                  | 203 |
| 13.5.3    | Steigung der Asymptoten des Amplitudengangs . . . . .                               | 203 |
| 13.5.4    | Bestimmung der Phase einer komplexen Zahl . . . . .                                 | 204 |
| <b>14</b> | <b>Fourierreihe und ihre Anwendung</b> . . . . .                                    | 207 |
| 14.1      | Definitionen . . . . .                                                              | 207 |
| 14.1.1    | Periodische Funktion . . . . .                                                      | 207 |
| 14.1.2    | Fourier-Reihen . . . . .                                                            | 208 |
| 14.1.3    | Gleichanteil, Grund- und Oberschwingungen,<br>Harmonische . . . . .                 | 208 |
| 14.2      | Eigenschaften . . . . .                                                             | 209 |
| 14.2.1    | Gerade und ungerade Funktionen . . . . .                                            | 209 |
| 14.2.2    | Amplituden- und Phasenwerte . . . . .                                               | 209 |
| 14.3      | Komplexe Fourierreihe . . . . .                                                     | 210 |
| 14.3.1    | Zusammenhang zwischen $a_n$ , $b_n$ und $c_n$ . . . . .                             | 212 |
| 14.4      | Das Linienspektrum . . . . .                                                        | 213 |
| 14.5      | Effektivwert . . . . .                                                              | 214 |
| 14.6      | Klirrfaktor . . . . .                                                               | 217 |
| 14.7      | Leistung . . . . .                                                                  | 217 |

|           |                                                                       |     |
|-----------|-----------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>15</b> | <b>Berechnung von Einschwingvorgängen</b>                             | 219 |
| 15.1      | Lineare Differentialgleichungen                                       | 219 |
| 15.1.1    | Lineare Differentialgleichung mit konstanten Koeffizienten            | 220 |
| 15.1.2    | Lösung der homogenen Differentialgleichung                            | 220 |
| 15.1.3    | Partikuläre Lösungen für spezielle $s(t)$                             | 221 |
| 15.1.4    | Diskussion der allgemeinen Lösung                                     | 222 |
| 15.2      | Laplace-Transformations                                               | 222 |
| 15.2.1    | Lösung von Differentialgleichungen mittels der Laplace-Transformation | 224 |
| 15.3      | Übertragungsfunktion, Frequenzgang und Stossantwort                   | 227 |
| <b>16</b> | <b>Elektrostatik</b>                                                  | 231 |
| 16.1      | Coulomb'sches Gesetz                                                  | 231 |
| 16.2      | Elektrische Feldstärke                                                | 234 |
| 16.3      | Leiter im elektrostatischen Feld                                      | 237 |
| 16.3.1    | Influenz                                                              | 238 |
| 16.4      | Elektrische Spannung und Potential                                    | 238 |
| 16.4.1    | Elektrische Spannung                                                  | 238 |
| 16.4.2    | Wegunabhängigkeit der elektrostatischen Spannung                      | 240 |
| 16.4.3    | Elektrisches Potential                                                | 241 |
| 16.4.4    | Äquipotentialflächen                                                  | 243 |
| 16.5      | Verschiebungsflussdichte und Fluss                                    | 243 |
| 16.5.1    | Der elektrische Fluss $\Psi$                                          | 244 |
| 16.5.2    | Elektrischer Fluss durch eine Hüllfläche                              | 245 |
| 16.5.3    | Berechnung von Feldstärke und Potential                               | 247 |
| 16.6      | Kapazität                                                             | 249 |
| 16.6.1    | Plattenkondensator                                                    | 251 |
| 16.6.2    | Zylinderkondensator                                                   | 252 |
| 16.6.3    | Berechnung von Kapazitäten                                            | 253 |
| 16.7      | Energie im elektrischen Feld                                          | 253 |
| 16.8      | Verhalten an Grenzflächen                                             | 256 |
| 16.8.1    | Brechungsgesetz                                                       | 257 |
| <b>17</b> | <b>Stationäres Strömungsfeld</b>                                      | 259 |
| 17.1      | Stromdichte                                                           | 259 |
| 17.2      | Ohmsches Gesetz im Strömungsfeld                                      | 262 |
| 17.3      | Wegunabhängigkeit der elektrischen Spannung                           | 263 |
| 17.4      | Energieumwandlung in Leitern                                          | 264 |
| 17.5      | Vergleich: Elektrostatik $\leftrightarrow$ stationäres Strömungsfeld  | 264 |
| 17.6      | Berechnung von Leitwerten                                             | 265 |

|           |                                                                     |     |
|-----------|---------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>18</b> | <b>Magnetfeld</b>                                                   | 269 |
| 18.1      | Magnetische Flussdichte und Magnetfeld                              | 270 |
| 18.2      | Die magnetischen Wirkungen des elektrischen Stromes                 | 271 |
| 18.3      | Magnetfeld eines langen Leiters                                     | 271 |
| 18.4      | Kraftwirkung auf einen stromdurchflossenen Leiter                   | 273 |
| 18.5      | Kraftwirkung auf eine bewegte Ladung                                | 273 |
| 18.6      | Biot-Savart                                                         | 274 |
| 18.7      | Durchflutungsgesetz                                                 | 277 |
| 18.8      | Magnetfeld einer Ringspule                                          | 278 |
| 18.9      | Magnetischer Fluss                                                  | 279 |
| 18.10     | Bedingungen an Grenzflächen                                         | 280 |
| 18.11     | Berechnung linearer Magnetkreise                                    | 281 |
| 18.11.1   | Der magnetische Kreis ohne Verzweigung                              | 282 |
| 18.11.2   | Der magnetische Kreis mit Verzweigung                               | 284 |
| 18.12     | Magnetisches Verhalten                                              | 285 |
| 18.13     | Berechnung nichtlinearer Magnetkreise                               | 287 |
| 18.14     | Kräfte auf hochpermeable Eisenflächen                               | 288 |
| <b>19</b> | <b>Induktionsgesetz und Induktivitäten</b>                          | 291 |
| 19.1      | Zeitlich veränderliche magnetische Felder                           | 291 |
| 19.1.1    | Induktionsgesetz                                                    | 291 |
| 19.1.2    | Verketteter Fluss $\Psi$                                            | 294 |
| 19.1.3    | Lenz'sche Regel                                                     | 295 |
| 19.1.4    | Die zweite Maxwellsche Gleichung                                    | 296 |
| 19.2      | Selbstinduktivität                                                  | 297 |
| 19.3      | Netzwerke mit Gegeninduktivitäten                                   | 299 |
| 19.3.1    | Repetition Induktionsgesetz und Selbstinduktivität                  | 299 |
| 19.3.2    | Gegeninduktivität                                                   | 301 |
| 19.3.3    | Zusammenhang zwischen Strömen und Spannungen bei gekoppelten Spulen | 302 |
| 19.3.4    | Vorzeichenregel                                                     | 303 |
| 19.3.5    | Sinusförmige Grössen                                                | 304 |
| 19.3.6    | Kopplungsfaktor                                                     | 306 |
| 19.3.7    | Serieschaltung von gekoppelten Induktivitäten                       | 307 |
| 19.3.8    | Vollständig gekoppelte Spulen                                       | 307 |
| 19.3.9    | Idealer Transformator                                               | 309 |
| 19.3.10   | Ersatzschaltbild ohne Kopplung                                      | 310 |
| 19.3.11   | Netzwerke mit Gegeninduktivitäten                                   | 310 |

---

|                                                                            |                                        |            |
|----------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|------------|
| <b>20</b>                                                                  | <b>Drahtlose Übertragung</b> . . . . . | <b>313</b> |
| 20.1                                                                       | Was ist überhaupt ein Feld? . . . . .  | 313        |
| 20.2                                                                       | Die vier Maxwell-Gleichungen . . . . . | 315        |
| 20.3                                                                       | Elektromagnetische Strahlung . . . . . | 316        |
| 20.4                                                                       | Mathematisches . . . . .               | 319        |
| 20.5                                                                       | Fazit . . . . .                        | 321        |
| <b>Anhang A1: Komplexe Zahlen</b> . . . . .                                |                                        | <b>323</b> |
| <b>Anhang A2: Logarithmierte Verhältnisgrößen</b> . . . . .                |                                        | <b>329</b> |
| <b>Anhang A3: Lineare Gleichungssysteme und Matrizenrechnung</b> . . . . . |                                        | <b>333</b> |
| <b>Stichwortverzeichnis</b> . . . . .                                      |                                        | <b>343</b> |