

## Elektrotechnik

H. Clausert, K. Hoffmann, W. Mathis, G. Wiesemann, H.-P. Beck

### Netzwerke

G. Wiesemann

|          |  |          |
|----------|--|----------|
| <b>1</b> | <b>Elektrische Stromkreise</b>   | <b>1</b> |
| 1.1      | Elektrische Ladung und elektrischer Strom  | 1        |
|          | 1.1.1 Elementarladung – 1.1.2 Elektrischer Strom – 1.1.3 1. Kirchhoff'scher Satz<br>(Satz von der Erhaltung der Ladungen; Strom-Knotengleichung)   |          |
| 1.2      | Energie und elektrische Spannung; Leistung   | 2        |
|          | 1.2.1 Definition der Spannung – 1.2.2 Energieaufnahme eines elektrischen Zweipols –<br>1.2.3 Elektrisches Potenzial – 1.2.4 Spannungsquellen – 1.2.5 2. Kirchhoff'scher Satz<br>(Satz von der Erhaltung der Energie; Spannungs-Maschengleichung) |          |
| 1.3      | Elektrischer Widerstand  | 4        |
|          | 1.3.1 Ohm'sches Gesetz – 1.3.2 Spezifischer Widerstand und Leitfähigkeit –<br>1.3.3 Temperaturabhängigkeit des Widerstandes  |          |
| <b>2</b> | <b>Wechselstrom</b>  | <b>7</b> |
| 2.1      | Beschreibung von Wechselströmen und -spannungen  | 7        |
| 2.2      | Mittelwerte periodischer Funktionen  | 8        |

|          |   |    |
|----------|---|----|
| 2.3      | Wechselstrom in Widerstand, Spule und Kondensator   | 8  |
| 2.4      | Zeigerdiagramm  | 9  |
| 2.5      | Impedanz und Admittanz  | 10 |
| 2.6      | Kirchhoff'sche Sätze für die komplexen Effektivwerte  | 10 |
| <b>3</b> | <b>Lineare Netze</b>  | 10 |
| 3.1      | Widerstandsnetze  | 10 |
|          | 3.1.1 Gruppenschaltungen – 3.1.2 Brückenschaltungen –<br>3.1.3 Stern-Dreieck-Umwandlung   |    |
| 3.2      | Strom- und Spannungsberechnung in linearen Netzen   | 13 |
|          | 3.2.1 Der Überlagerungssatz (Superpositionsprinzip) – 3.2.2 Ersatz-Zweipolquellen –<br>3.2.3 Maschen- und Knotenanalyse   |    |
| 3.3      | Vierpole  | 19 |
|          | 3.3.1 Vierpolgleichungen in der Leitwertform – 3.3.2 Vierpolgleichungen<br>in der Widerstandsform – 3.3.3 Vierpolgleichungen in der Kettenform  |    |
| <b>4</b> | <b>Schwingkreise</b>  | 20 |
| 4.1      | Phasen- und Betragsresonanz   | 20 |
| 4.2      | Einfache Schwingkreise  | 20 |
|          | 4.2.1 Reihenschwingkreis – 4.2.2 Parallelschwingkreis – 4.2.3 Spannungsüberhöhung<br>am Reihenschwingkreis – 4.2.4 Bandbreite   |    |
| 4.3      | Parallelschwingkreis mit Wicklungsverlusten   | 22 |
| 4.4      | Reaktanzzweipole  | 22 |
|          | 4.4.1 Verlustloser Reihen- und Parallelschwingkreis – 4.4.2 Kombinationen verlustloser<br>Schwingkreise   |    |
| <b>5</b> | <b>Leistung in linearen Schaltungen</b>   | 24 |
| 5.1      | Leistung in Gleichstromkreisen  | 24 |
|          | 5.1.1 Wirkungsgrad – 5.1.2 Leistungsanpassung – 5.1.3 Belastbarkeit von Leitungen   |    |
| 5.2      | Leistung in Wechselstromkreisen   | 25 |
|          | 5.2.1 Wirk-, Blind- und Scheinleistung – 5.2.2 Wirkleistungsanpassung   |    |
| <b>6</b> | <b>Der Transformator</b>  | 27 |
| 6.1      | Schaltzeichen   | 27 |
| 6.2      | Der eisenfreie Transformator  | 27 |
|          | 6.2.1 Transformator-Gleichungen – 6.2.2 Verlustloser Transformator – 6.2.3 Verlust-<br>und streuungsfreier Transformator – 6.2.4 Idealer Transformator – 6.2.5 Streufaktor<br>und Kopplungsfaktor – 6.2.6 Vierpolersatzschaltungen – 6.2.7 Zweipolersatzschaltung |    |
| 6.3      | Transformator mit Eisenkern   | 29 |
| <b>7</b> | <b>Drehstrom</b>  | 29 |
| 7.1      | Spannungen symmetrischer Drehstromgeneratoren   | 29 |
| 7.2      | Die Spannung zwischen Generator- und Verbrauchersternpunkt  | 31 |
| 7.3      | Symmetrische Drehstromsysteme<br>(symmetrische Belastung symmetrischer Drehstromgeneratoren)  | 31 |
| 7.4      | Asymmetrische Belastung eines symmetrischen Generators  | 32 |
|          | 7.4.1 Verbraucher-Sternschaltung – 7.4.2 Verbraucher-Dreieckschaltung   |    |
| 7.5      | Wirkleistungsmessung im Drehstromsystem<br>(Zwei-Leistungsmesser-Methode, Aronschaltung)  | 33 |
| <b>8</b> | <b>Nichtlineare Schaltungen</b>   | 33 |
| 8.1      | Linearität  | 33 |
| 8.2      | Nichtlineare Kennlinien   | 34 |
|          | 8.2.1 Beispiele nichtlinearer Strom-Spannungs-Kennlinien von Zweipolen –<br>8.2.2 Verstärkungskennlinie des Operationsverstärkers   |    |
| 8.3      | Graphische Lösung durch Schnitt zweier Kennlinien   | 35 |
|          | 8.3.1 Arbeitsgerade und Verbraucher kennlinie – 8.3.2 Stabile und instabile<br>Arbeitspunkte einer Schaltung mit nichtlinearem Zweipol – 8.3.3 Rückkopplung<br>von Operationsverstärkern  |    |

|     |   |    |
|-----|---|----|
| 8.4 | Graphische Zusammenfassung von Strom-Spannungs-Kennlinien . . . . | 38 |
|     | 8.4.1 Reihenschaltung – 8.4.2 Parallelschaltung                   |    |
| 8.5 | Lösung durch abschnittweises Linearisieren . . . . .              | 39 |

## Felder

H. Clausert

|           |   |    |
|-----------|---|----|
| <b>9</b>  | <b>Leitungen</b> . . . . .  | 40 |
| 9.1       | Die Differenzialgleichungen der Leitung und ihre Lösungen . . . . .   | 40 |
| 9.2       | Die charakteristischen Größen der Leitung . . . . .   | 41 |
| 9.3       | Die Leitungsgleichungen . . . . .   | 41 |
| 9.4       | Der Eingangswiderstand . . . . .  | 42 |
| 9.5       | Der Reflexionsfaktor . . . . .  | 42 |
| <b>10</b> | <b>Elektrostatistische Felder</b> . . . . .   | 42 |
| 10.1      | Skalare und vektorielle Feldgrößen . . . . .  | 42 |
| 10.2      | Die elektrische Feldstärke . . . . .  | 42 |
| 10.3      | Die elektrische Flussdichte . . . . .   | 43 |
| 10.4      | Die Potenzialfunktion spezieller Ladungsverteilungen . . . . .  | 45 |
| 10.5      | Influenz . . . . .  | 45 |
| 10.6      | Die Kapazität . . . . .   | 45 |
| 10.7      | Die Kapazität spezieller Anordnungen . . . . .  | 46 |
| 10.8      | Energie und Kräfte . . . . .  | 47 |
| 10.9      | Bedingungen an Grenzflächen . . . . .   | 48 |
| <b>11</b> | <b>Stationäre elektrische Strömungsfelder</b> . . . . .   | 49 |
| 11.1      | Die Grundgesetze . . . . .  | 49 |
| 11.2      | Methoden zur Berechnung von Widerständen . . . . .  | 49 |
| 11.3      | Bedingungen an Grenzflächen . . . . .   | 50 |
| <b>12</b> | <b>Stationäre Magnetfelder</b> . . . . .  | 50 |
| 12.1      | Die magnetische Flussdichte . . . . .   | 50 |
| 12.2      | Die magnetische Feldstärke . . . . .  | 51 |
| 12.3      | Der magnetische Fluss . . . . .   | 53 |
| 12.4      | Bedingungen an Grenzflächen . . . . .   | 53 |
| 12.5      | Magnetische Kreise . . . . .  | 53 |
| <b>13</b> | <b>Zeitlich veränderliche Magnetfelder</b> . . . . .  | 55 |
| 13.1      | Das Induktionsgesetz . . . . .  | 55 |
| 13.2      | Die magnetische Energie . . . . .   | 56 |
| 13.3      | Induktivitäten . . . . .  | 57 |
|           | 13.3.1 Die Selbstinduktivität – 13.3.2 Die Gegeninduktivität – 13.3.3 Berechnung<br>von Selbst- und Gegeninduktivitäten – 13.3.4 Die gespeicherte Energie |    |
| 13.4      | Kräfte im Magnetfeld . . . . .  | 59 |
| <b>14</b> | <b>Elektromagnetische Felder</b> . . . . .  | 60 |
| 14.1      | Die Maxwell'schen Gleichungen in integraler und differenzieller Form . . . . .  | 60 |
| 14.2      | Die Einteilung der elektromagnetischen Felder . . . . .   | 60 |
| 14.3      | Die Maxwell'schen Gleichungen bei harmonischer Zeitabhängigkeit . . . . .   | 61 |
| <b>15</b> | <b>Elektromagnetische Wellen</b> . . . . .  | 61 |
| 15.1      | Die Wellengleichung . . . . .   | 61 |
| 15.2      | Die Anregung elektromagnetischer Wellen . . . . .   | 63 |
| 15.3      | Die abgestrahlte Leistung . . . . .   | 64 |
| 15.4      | Die Phase und aus dieser abgeleitete Begriffe . . . . .   | 64 |

*Energietechnik*

H.-P. Beck

|   |    |
|---|----|
| <b>16 Grundlagen der Energiewandlung</b>  | 67 |
| 16.1 Grundbegriffe  | 67 |
| 16.1.1 Energie, Arbeit, Leistung, Wirkungsgrad – 16.1.2 Energietechnische Betrachtungsweisen – 16.1.3 Definitionen  |    |
| 16.2 Elektrodynamische Energiewandlung  | 68 |
| 16.2.1 Energiedichte in magnetischen und elektrischen Feldern – 16.2.2 Energiewandlung in elektrischen Maschinen – 16.2.3 Kommutatormaschinen – 16.2.4 Magnetisches Drehfeld – 16.2.5 Synchronmaschine – 16.2.6 Asynchronmaschinen  |    |
| 16.3 Elektromagnete   | 75 |
| 16.4 Thermische Wirkungen des elektrischen Stromes  | 75 |
| 16.4.1 Widerstandserwärmung – 16.4.2 Bogenentladung   |    |
| 16.5 Chemische Wirkungen des elektrischen Stromes   | 76 |
| 16.5.1 Primärelemente – 16.5.2 Sekundärzellen   |    |
| 16.6 Direkte Energiewandlung, fotovoltaischer Effekt, Solarzellen   | 77 |
| <b>17 Übertragung elektrischer Energie</b>  | 77 |
| 17.1 Leistungsdichte, Spannungsabfall   | 77 |
| 17.2 Stabilitätsprobleme  | 79 |
| <b>18 Umformung elektrischer Energie</b>  | 79 |
| 18.1 Schalten und Kommutieren   | 79 |
| 18.2 Gleichrichter, Wechselrichter, Umrichter   | 81 |
| 18.2.1 Leistungselektronik – 18.2.2 Grundfunktionen der Energieumformung – 18.2.3 Umrichtertypen – 18.2.4 Halbleiterschalter und -steller (nichtkommutierende Stromrichter) – 18.2.5 Netzgeführte Stromrichter mit natürlicher Kommutierung – 18.2.6 Selbstgeführte Stromrichter mit Zwangskommutierung mittels abschaltbarer Ventile |    |

*Nachrichtentechnik*

K. Hoffmann, W. Mathis

|   |    |
|---|----|
| <b>19 Grundbegriffe</b>   | 90 |
| 19.1 Signal, Information, Nachricht   | 90 |
| 19.1.1 Beschreibung zeitabhängiger Signale – 19.1.2 Deterministische und stochastische Signale – 19.1.3 Symbolische Darstellungsweise, Bewertung – 19.1.4 Unverschlüsselte und codierte Darstellung |    |
| 19.2 Aufbereitung, Übertragung, Verarbeitung  | 91 |
| 19.2.1 Grundprinzip der Signalübertragung – 19.2.2 Eigenschaften von Quellen und Senken – 19.2.3 Grundschemata der Kommunikation – 19.2.4 Betriebsweise der Vielfachnutzung                         |    |
| 19.3 Schnittstelle, Funktionsblock, System  | 92 |
| 19.3.1 Konstruktive und funktionelle Abgrenzung – 19.3.2 Mathematische Beschreibungsformen – 19.3.3 Darstellung in Funktionsblockbildern – 19.3.4 Zusammenwirken und Betriebsverhalten              |    |
| <b>20 Signaleigenschaften</b>   | 93 |
| 20.1 Signaldynamik, Verzerrungen  | 93 |
| 20.1.1 Dämpfungsmaß und Pegelangaben – 20.1.2 Lineare und nichtlineare Verzerrungen   |    |
| 20.2 Auflösung, Störungen, Störabstand  | 94 |
| 20.2.1 Empfindlichkeit und Aussteuerung – 20.2.2 Störungsarten und Auswirkungen – 20.2.3 Maßnahmen zur Störverminderung   |    |
| 20.3 Informationsfluss, Nachrichtengehalt   | 95 |
| 20.3.1 Herleitung des Entscheidungsbaumes – 20.3.2 Darstellung mit Nachrichtenquader – 20.3.3 Grenzwerte und Mittelungszeitraum – 20.3.4 Kanalkapazität und Informationsverlust                     |    |

|           |  |     |
|-----------|--|-----|
| 20.4      | Relevanz, Redundanz, Fehlerkorrektur   | 96  |
| 20.4.1    | Erkennungssicherheit bei Mustern – 20.4.2 Störeinflüsse und Redundanz –            |     |
| 20.4.3    | Fehlererkennung und Fehlerkorrektur  |     |
| <b>21</b> | <b>Beschreibungsweisen</b>   | 97  |
| 21.1      | Signalfilterung, Korrelation   | 97  |
| 21.1.1    | Reichweite des Filterungsbegriffes – 21.1.2 Lineare und nichtlineare               |     |
|           | Verzerrungen – 21.1.3 Redundanzverteilung in Mustern – 21.1.4 Kreuz-               |     |
|           | und Autokorrelation – 21.1.5 Änderung der Redundanzverteilung                      |     |
| 21.2      | Analoge und digitale Signalbeschreibung  | 98  |
| 21.2.1    | Lineare Beschreibungsweise, Überlagerung – 21.2.2 Beschreibung nichtlinearer       |     |
|           | Zusammenhänge – 21.2.3 Parallele und serielle Bearbeitung                          |     |
| <b>22</b> | <b>Aufbereitungsverfahren</b>  | 99  |
| 22.1      | Basisbandsignale, Signalwandler  | 99  |
| 22.1.1    | Dynamik der Signalquellen – 22.1.2 Direktwandler, Steuerungswandler                |     |
| 22.2      | Abtastung, Quantisierung, Codierung  | 101 |
| 22.2.1    | Zeitquantisierung, Abtasttheorem – 22.2.2 Amplitudenquantisierung –                |     |
| 22.2.3    | Differenz- und Blockcodierung – 22.2.4 Quellen- und Kanalcodierung                 |     |
| 22.3      | Sinusträger- und Pulsmodulation  | 103 |
| 22.3.1    | Modulationsprinzip und Darstellungsarten – 22.3.2 Zwei-, Ein-                      |     |
|           | und Restseitenbandmodulation – 22.3.3 Frequenz- und Phasenmodulation –             |     |
| 22.3.4    | Zeitkontinuierliche Umtastmodulation – 22.3.5 Kontinuierliche Pulsmodulation –     |     |
| 22.3.6    | Pulscod-, Delta- und Sigma-Delta Modulation  |     |
| 22.4      | Raum-, Frequenz- und Zeitmultiplex   | 108 |
| 22.4.1    | Baum- und Matrixstruktur – 22.4.2 Durchschalt- und Speicherverfahren –             |     |
| 22.4.3    | Zugänglichkeit und Blockierung – 22.4.4 Trägerfrequenzverfahren –                  |     |
| 22.4.5    | Geschlossene und offene Systeme – 22.4.6 Zeitschlitz-                              |     |
|           | und Amplitudenauswertung   |     |
| <b>23</b> | <b>Signalübertragung</b>   | 111 |
| 23.1      | Kanaleigenschaften, Übertragungsrate   | 111 |
| 23.1.1    | Eigenschaften, Verzerrungen, Entzerrung – 23.1.2 Nutzungsgrad                      |     |
|           | und Kompressionssysteme  |     |
| 23.2      | Leitungsgebundene Übertragungswege   | 112 |
| 23.2.1    | Symmetrische und unsymmetrische Leitungen – 23.2.2 Hohlleiter-                     |     |
|           | und Glasfaserarten – 23.2.3 Kabelnetze   |     |
| 23.3      | Datenetze, integrierte Dienste   | 114 |
| 23.3.1    | Netzgestaltung, Vermittlungsprotokoll – 23.3.2 Fernschreiben,                      |     |
|           | Bildfernübertragung – 23.3.3 Verbundnetze mit Dienstintegration                    |     |
| 23.4      | Richtfunk, Rundfunk, Sprechfunk  | 115 |
| 23.4.1    | Funkwege, Antennen, Wellenausbreitung – 23.4.2 Punkt-zu-Punkt-Verbindung,          |     |
|           | Systemparameter – 23.4.3 Ton- und Fernsehrundfunk – 23.4.4 Stationärer und mobiler |     |
|           | Sprechfunk   |     |
| <b>24</b> | <b>Signalverarbeitung</b>  | 117 |
| 24.1      | Detektionsverfahren, Funkmessung   | 117 |
| 24.1.1    | Detektionsprinzipien, Auflösungsgrenze – 24.1.2 Aussteuerung                       |     |
|           | und Verzerrungen – 24.1.3 Amplituden- und Frequenzdemodulation –                   |     |
| 24.1.4    | Pulsdemodulation, Augendiagramm – 24.1.5 Funkmessprinzip und                       |     |
|           | Signalauswertung   |     |
| 24.2      | Signalrekonstruktion, Signalspeicherung  | 120 |
| 24.2.1    | Systemadaption und Umsetzalgorithmen – 24.2.2 Speicherdichte, Schreib-             |     |
|           | und Leserate – 24.2.3 Flüchtige und remanente Speicherung – 24.2.4 Magnetische,    |     |
|           | elektrische und optische Speicher  |     |
| 24.3      | Signalverarbeitung und Signalvermittlung   | 122 |
| 24.3.1    | Strukturen für die Verarbeitung analoger und digitaler Signale –                   |     |
| 24.3.2    | Signalauswertung und Parametersteuerung – 24.3.3 Rekursion, Adaption,              |     |
|           | Stabilität, Verklemmung – 24.3.4 Netzarten, Netzführung, Ausfallverhalten –        |     |
| 24.3.5    | Belegungsdichte, Verlust und Wartezeitsysteme                                      |     |

*Elektronik*

K. Hoffmann, W. Mathis, G. Wiesemann

|  |     |
|--|-----|
| <b>25 Analoge Grundsaltungen</b>   | 125 |
| 25.1 Passive Netzwerke (RLC-Saltungen)   | 125 |
| 25.1.1 Tief- und Hochpassschaltung – 25.1.2 Differenzier- und Integrierglieder – 25.1.3 Bandpässe, Bandsperren, Allpässe – 25.1.4 Resonanzfilter und Übertrager  |     |
| 25.2 Nichtlineare Zweipole (Dioden)  | 128 |
| 25.2.1 Diodenverhalten (Beschreibung) – 25.2.2 Gleichrichterschaltungen – 25.2.3 Mischer und Demodulatoren – 25.2.4 Besondere Diodenschaltungen  |     |
| 25.3 Aktive Dreipole (Transistoren)  | 132 |
| 25.3.1 Transistorverhalten – 25.3.2 Lineare Kleinsignalverstärker – 25.3.3 Lineare Großsignalverstärker (A- und B-Betrieb) und Sinusoszillatoren – 25.3.4 Nichtlineare Großsignalverstärker, Flip-Flop und Relaxationsoszillatoren   |     |
| 25.4 Operationsverstärker  | 143 |
| 25.4.1 Verstärkung – 25.4.2 Idealer und realer Operationsverstärker – 25.4.3 Komparatoren – 25.4.4 Anwendungen des Umkehrverstärkers – 25.4.5 Anwendungen des Elektrometervverstärkers – 25.4.6 Mitkopplungsschaltungen (Schmitt-Trigger)  |     |
| <b>26 Digitale Grundsaltungen</b>  | 151 |
| 26.1 Gatter  | 151 |
| 26.1.1 Diodengatter – 26.1.2 Der Transistor als Inverter – 26.1.3 DTL-Gatter – 26.1.4 TTL-Gatter – 26.1.5 Schaltkreisfamilien (Übersicht) – 26.1.6 Beispiele digitaler Schaltnetze   |     |
| 26.2 Ein-Bit-Speicher  | 157 |
| 26.2.1 Einfache Kippschaltungen – 26.2.2 Getaktete SR-Flipflops – 26.2.3 Flipflops mit Zwischenspeicherung (Master-Slave-Flipflops, Zählflipflops)   |     |
| 26.3 Schaltwerke   | 161 |
| 26.3.1 Auffang- und Schieberegister – 26.3.2 Zähler  |     |
| <b>27 Halbleiterbauelemente</b>  | 163 |
| 27.1 Grundprinzipien elektronischer Halbleiterbauelemente  | 163 |
| 27.1.1 Ladungsträger in Silizium – 27.1.2 Das Bändermodell – 27.1.3 Stromleitung in Halbleitern – 27.1.4 Ausgleichsvorgänge bei der Injektion von Ladungsträgern   |     |
| 27.2 Halbleiterdioden  | 167 |
| 27.2.1 Aufbau und Wirkungsweise des PN-Überganges – 27.2.2 Der PN-Übergang in Flusspolung – 27.2.3 Der PN-Übergang in Sperrpolung – 27.2.4 Durchbruchmechanismen – 27.2.5 Kennliniengleichung des PN-Überganges – 27.2.6 Zenerdioden – 27.2.7 Tunneldioden – 27.2.8 Kapazitätsdioden („Varaktoren“) – 27.2.9 Leistungsgleichrichterdioden, PIN-Dioden – 27.2.10 Mikrowellendioden, Rückwärtsdioden |     |
| 27.3 Bipolare Transistoren   | 172 |
| 27.3.1 Prinzip und Wirkungsweise – 27.3.2 Universaltransistoren. Kleinleistungstransistoren – 27.3.3 Schalttransistoren  |     |
| 27.4 Halbleiterleistungsbauelemente  | 175 |
| 27.4.1 Der Thyristor – 27.4.2 Der abschaltbare Thyristor – 27.4.3 Zweirichtungs-Thyristordiode (Diac) – 27.4.4 Bidirektionale Thyristordiode (Triac)   |     |
| 27.5 Feldeffektbauelemente   | 178 |
| 27.5.1 Sperrschicht-Feldeffekt-Transistoren (Junction-FET, PN-FET, MSFET oder JFET) – 27.5.2 Feldeffekttransistoren mit isoliertem Gate (IG-FET, MISFET, MOSFET oder MNSFET)   |     |
| 27.6 Optoelektronische Halbleiterbauelemente   | 182 |
| 27.6.1 Innerer Fotoeffekt – 27.6.2 Der Fotowiderstand – 27.6.3 Der PN-Übergang bei Lichteinwirkung – 27.6.4 Der Fototransistor – 27.6.5 Die Lumineszenzdiode (LED)   |     |
| <b>Literatur</b>   | 185 |

Das Ingenieurwissen: Elektrotechnik

Clausert, H.; Hoffmann, K.; Mathis, W.; Wieseemann, G.;

Beck, H.-P.

2014, XII, 188 S. 150 Abb., Softcover

ISBN: 978-3-662-44031-5