

# HANSER



## Leseprobe

zu

## Elektrotechnik für Ingenieur:innen

von Rainer Ose

Print-ISBN: 978-3-446-47479-6

E-Book-ISBN: 978-3-446-47480-2

Weitere Informationen und Bestellungen unter

<https://www.hanser-kundencenter.de/fachbuch/artikel/9783446474796>

sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

---

## Vorwort zur 7. Auflage

Das vorliegende Lehrbuch gliedert sich in die drei klassischen Grundlagenbereiche: Gleichstromlehre – Wechselstromtechnik – Elektrische und magnetische Felder.

Es ist als studienbegleitendes Material für Studierende aller technischen Studienrichtungen an Hochschulen/Fachhochschulen konzipiert. Im Vordergrund stehen Betrachtungen zu Vorgängen in elektrischen Stromkreisen aus der Sicht der Schaltungstechnik. Damit wird das Ziel verfolgt, das in den Vorlesungen „Grundlagen der Elektrotechnik“ vermittelte Grundlagenwissen in anwendungsbereiter Form für die nachfolgenden Lehrveranstaltungen bereitzustellen.

Die theoretischen Grundlagen werden zu jedem Kapitel so dargelegt, dass die Studierenden die Vorlesungsmitschrift und den eventuell versäumten Stoff in effektiver Form selbstständig aufarbeiten können. Dazu dienen u.a. Modelle und Analogien, die komplizierte Sachverhalte in möglichst einfacher und leicht verständlicher Form darlegen sollen. Zur Erhöhung der Anschaulichkeit wurden viele Aussagen zusätzlich aus Diagrammen, Prinzipskizzen und Ersatzschaltungen abgeleitet.

In jedem Kapitel befinden sich Lehrbeispiele zur Erklärung typischer Erscheinungen der Elektrotechnik sowie zur Demonstration von Berechnungsmethoden und -verfahren. Soweit sie nicht die Größenordnung eines dargelegten Sachverhalts verdeutlichen sollen, sind diese Lehrbeispiele in allgemeiner Form ausgeführt. Damit gelingt es den Anwendern, den Lösungsweg schrittweise nachzuvollziehen.

Die 7. Auflage entstand durch eine vollständige Überarbeitung und Erweiterung der 5./6. Auflage des Lehrbuchs. Alle Berechnungsbeispiele (BB) befinden sich jetzt in erweiterter Form in einem neu aufgelegten Übungsbuch (ÜB). Die 7. Auflage enthält einen Anhang mit Übungsaufgaben und eine separate Formelsammlung. Alle Lösungen der Übungsaufgaben sind über das Internet zugänglich.

Wolfenbüttel, im August 2022

Rainer Ose  
e-mail: [r.ose@ostfalia.de](mailto:r.ose@ostfalia.de)

## Hinweise zur Arbeit mit diesem Buch

Das vorliegende Lehrbuch sollte in Kombination mit dem Übungsbuch bearbeitet werden. Aus diesem Grund wurden zahlreiche Lehrbeispiele in das Lehrbuch und zusätzliche Übungsanteile in das neue Übungsbuch eingearbeitet. Machen Sie sich zunächst mit den theoretischen Grundlagen vertraut. Parallel dazu können Sie die Lehrbeispiele (Lehrbuch) und die Berechnungsbeispiele (BB) aus dem Übungsbuch (ÜB) durcharbeiten. ÜB: BB x.y  
Diese Beispiele tragen zur Erhöhung des Verständnisses für die betrachteten Stoffgebiete bei.

### • Lehrbeispiele:

Lehrbeispiele dienen dazu, das grundlegende Verständnis für den jeweils dargelegten Sachverhalt an einem einfachen und überschaubaren Beispiel zu entwickeln bzw. zu festigen. Sie werden im laufenden Text an den Stellen eingefügt, an denen es eventuell zusätzlichen Erklärungsbedarf gibt. Dazu zählen das Aufstellen allgemeiner Lösungsansätze und die Durchführung einfacher Berechnungen sowie die Vermittlung von Vorstellungen über ausgewählte Erscheinungen der Elektrotechnik.

### • Übungsaufgaben: (Lösungen: [https://www.ostfalia.de/cms/de/pws/ose/Buch\\_ET\\_6A/](https://www.ostfalia.de/cms/de/pws/ose/Buch_ET_6A/))

Im Anhang des Buches befinden sich Übungsaufgaben. Sie sollen von dem Studierenden möglichst selbstständig abgearbeitet werden. Übungsaufgaben werden im Sinne einer zielgerichteten Prüfungsvorbereitung mit der folgenden Kennzeichnung dem jeweiligen Grundlagenbereich zugeordnet:

ÜA\_1 = Gleichstromlehre, ÜA\_2 = Wechselstromtechnik und ÜA\_3 = Felder.

Die meisten Beispiele und Übungsaufgaben können mit Simulationsprogrammen nachvollzogen werden. Entsprechende Hinweise zur Arbeit mit PSPICE findet man bei Bedarf in [11] – Kap. 1.

---

# Inhaltsverzeichnis

## I Gleichstromlehre

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>Elektrische Grundgrößen</b>                         | <b>12</b> |
| 1.1      | Elektrische Ladung                                     | 12        |
| 1.2      | Elektrische Stromstärke                                | 13        |
| 1.3      | Elektrische Spannung                                   | 16        |
| 1.4      | Elektrischer Gleichstromkreis                          | 17        |
| 1.5      | Widerstände im elektrischen Stromkreis                 | 20        |
| 1.5.1    | Bemessungsgleichung                                    | 20        |
| 1.5.2    | Temperaturabhängigkeit                                 | 21        |
| 1.5.3    | Technische Ausführungsformen                           | 22        |
| <b>2</b> | <b>Gesetze zur Berechnung elektrischer Stromkreise</b> | <b>23</b> |
| 2.1      | Das OHMSche Gesetz                                     | 23        |
| 2.2      | Die KIRCHHOFFSchen Sätze                               | 26        |
| 2.2.1    | Maschensatz  | 26        |
| 2.2.2    | Knotenpunktsatz  | 27        |
| 2.3      | Energiesatz  | 28        |
| <b>3</b> | <b>Lineare elektrische Gleichstromkreise</b>           | <b>31</b> |
| 3.1      | Eigenschaften elektrischer Stromkreise                 | 31        |
| 3.2      | Regeln zur Berechnung passiver Zweipole                | 33        |
| 3.2.1    | Reihenschaltung und Spannungsteilerregel               | 33        |
| 3.2.2    | Parallelschaltung und Stromteilerregel                 | 35        |
| 3.3      | Berechnung passiver Zweipole                           | 38        |
| 3.4      | Elektrische Quellen                                    | 40        |
| 3.5      | Lastfälle im Grundstromkreis                           | 44        |
| 3.5.1    | Leistung und Wirkungsgrad                              | 44        |
| 3.5.2    | Anpassungsfall   | 45        |
| 3.5.3    | Diskussion von Lastfällen                              | 47        |
| 3.5.4    | Belasteter Spannungsteiler                             | 49        |
| <b>4</b> | <b>Grundsaltungen der elektrischen Messtechnik</b>     | <b>52</b> |
| 4.1      | Messbereichserweiterung                                | 52        |
| 4.2      | Aufnahme von Kennlinien                                | 54        |
| 4.2.1    | Stromrichtige Messung                                  | 54        |
| 4.2.2    | Spannungsrichtige Messung                              | 55        |
| 4.3      | Messgeräte mit Nullindikator                           | 56        |
| 4.4      | Allgemeine Berechnung von Brückenschaltungen           | 59        |
| 4.4.1    | Allgemeine Umrechnung in eine Sternschaltung           | 59        |

|           |  |            |
|-----------|--|------------|
| 4.4.2     | Dreieck-Stern-Transformation .....                       | 61         |
| 4.4.3     | Stern-Dreieck-Transformation .....                       | 63         |
| <b>5</b>  | <b>Verfahren zur Berechnung linearer Netzwerke .....</b> | <b>65</b>  |
| 5.1       | Netzwerkberechnung nach KIRCHHOFF .....                  | 65         |
| 5.2       | Der HELMHOLTZsche Überlagerungssatz .....                | 68         |
| 5.3       | Zweipoltheorie .....                                     | 70         |
| 5.3.1     | Spannungsquellen-Ersatzschaltung .....                   | 71         |
| 5.3.2     | Stromquellen-Ersatzschaltung .....                       | 73         |
| 5.4       | Analyseverfahren .....                                   | 76         |
| 5.4.1     | Umlaufanalyse .....                                      | 76         |
| 5.4.2     | Knotenanalyse .....                                      | 80         |
| <b>6</b>  | <b>Stromkreise mit nichtlinearen Bauelementen .....</b>  | <b>84</b>  |
| 6.1       | Strom-Spannungs-Kennlinie .....                          | 84         |
| 6.2       | Ausgewählte Kennlinien nichtlinearer Bauelemente .....   | 85         |
| 6.3       | Konstruktion von Ersatz-Kennlinien .....                 | 89         |
| 6.3.1     | Ersatz-Kennlinien von Elementarschaltungen .....         | 89         |
| 6.3.2     | Idealisierte Kennlinien und Ersatzschaltungen .....      | 90         |
| 6.4       | Grafische Bestimmung des Arbeitspunktes .....            | 91         |
| <b>II</b> | <b>Wechselstromtechnik</b>                               |            |
| <b>7</b>  | <b>Beschreibung von Wechselgrößen .....</b>              | <b>94</b>  |
| 7.1       | Periodische Zeitfunktionen .....                         | 94         |
| 7.2       | Sinusförmige Zeitfunktionen .....                        | 95         |
| 7.3       | Mittelwerte periodischer Zeitfunktionen .....            | 97         |
| 7.3.1     | Arithmetischer Mittelwert .....                          | 97         |
| 7.3.2     | Gleichrichtwert .....                                    | 97         |
| 7.3.3     | Effektivwert .....                                       | 99         |
| 7.4       | Überlagerung sinusförmiger Zeitfunktionen .....          | 101        |
| <b>8</b>  | <b>Widerstände im Wechselstromkreis .....</b>            | <b>106</b> |
| 8.1       | Elementare Zweipole .....                                | 106        |
| 8.1.1     | Ohmscher Widerstand .....                                | 106        |
| 8.1.2     | Induktiver Blindwiderstand .....                         | 107        |
| 8.1.3     | Kapazitiver Blindwiderstand .....                        | 109        |
| 8.2       | Reale Bauelemente .....                                  | 110        |
| 8.2.1     | Reale Spule .....  | 110        |
| 8.2.2     | Realer Kondensator .....                                 | 112        |
| 8.3       | Elementarschaltungen .....                               | 113        |

|           |  |            |
|-----------|--|------------|
| 8.4       | Zeigerbilder .....   | 115        |
| 8.4.1     | Gemischte RLC-Kombinationen .....                                      | 115        |
| 8.4.2     | Brückenschaltungen .....   | 118        |
| <b>9</b>  | <b>Berechnung von Stromkreisen bei sinusförmiger Einspeisung .....</b> | <b>120</b> |
| 9.1       | Berechnung im Zeitbereich .....  | 120        |
| 9.2       | Berechnung im Bildbereich .....  | 122        |
| 9.2.1     | Zeigerdarstellung .....  | 122        |
| 9.2.2     | Rechenregeln .....   | 123        |
| 9.2.3     | Transformationsregeln .....  | 126        |
| 9.2.4     | Komplexer Widerstand .....   | 128        |
| 9.2.5     | Komplexer Leitwert .....   | 130        |
| 9.3       | Gemischte Schaltungen im Wechselstromkreis .....                       | 131        |
| 9.3.1     | Rechnerische Lösung im Bildbereich .....                               | 131        |
| 9.3.2     | Grafische Lösung im Bildbereich .....                                  | 135        |
| 9.3.3     | Variation von Betriebsparametern .....                                 | 137        |
| 9.4       | Spezielle Wechselstromschaltungen .....                                | 141        |
| 9.5       | Wechselstrom-Brücken .....   | 143        |
| 9.5.1     | Induktivitätsmessbrücke .....  | 145        |
| 9.5.2     | Kapazitätsmessbrücke .....   | 146        |
| 9.5.3     | Phasendrehbrücke .....   | 147        |
| 9.6       | Verfahren zur Netzwerkberechnung .....                                 | 149        |
| 9.6.1     | Überlagerungsverfahren .....   | 149        |
| 9.6.2     | Zweipoltheorie .....   | 151        |
| 9.6.3     | Analyseverfahren .....   | 153        |
| <b>10</b> | <b>Frequenzabhängigkeit der Wechselstromkreise .....</b>               | <b>156</b> |
| 10.1      | Komplexer Frequenzgang .....   | 156        |
| 10.2      | Tief- und Hochpässe .....  | 157        |
| 10.3      | Schwingkreise .....  | 162        |
| 10.4      | Übertragungsvierpole .....   | 174        |
| 10.5      | Modelle für Leitungen .....  | 179        |
| 10.5.1    | Elektrisch kurze Leitung .....   | 179        |
| 10.5.2    | Leitungsgleichungen .....  | 180        |
| 10.5.3    | Wellenmodell .....   | 183        |
| <b>11</b> | <b>Leistungsbetrachtungen im Wechselstromkreis .....</b>               | <b>186</b> |
| 11.1      | Zeitfunktion der Leistung .....  | 186        |
| 11.2      | Wirk-, Blind- und Scheinleistung .....                                 | 188        |
| 11.3      | Komplexe Leistung .....  | 189        |
| 11.4      | Leistungsfaktor und seine Verbesserung .....                           | 191        |

|            |   |            |
|------------|---|------------|
| <b>12</b>  | <b>Dreiphasensysteme</b>                                    | <b>195</b> |
| 12.1       | Symmetrischer Drehstromgenerator                            | 195        |
| 12.2       | Spannungen und Ströme                                       | 196        |
| 12.3       | Belastungsarten   | 200        |
| 12.4       | Leistung im Dreiphasensystem                                | 204        |
| 12.5       | Symmetrische Komponenten                                    | 209        |
| 12.5.1     | Entstehung unsymmetrischer Dreiphasensysteme                | 209        |
| 12.5.2     | Zerlegung in symmetrische Komponenten                       | 211        |
| 12.5.3     | Komponenten-Ersatzschaltungen                               | 212        |
| <br>       |   |            |
| <b>III</b> | <b>Elektrische und magnetische Felder</b>                   |            |
| <br>       |   |            |
| <b>13</b>  | <b>Feldbegriff</b>  | <b>214</b> |
| 13.1       | Begriffsbestimmung  | 214        |
| 13.1.1     | Begriff „Feldpunkt“   | 214        |
| 13.1.2     | Begriff „Rechtssystem“                                      | 215        |
| 13.2       | Einteilung der Felder                                       | 216        |
| 13.3       | Eigenschaften elektrischer und magnetischer Felder          | 218        |
| <br>       |   |            |
| <b>14</b>  | <b>Stationäres elektrisches Strömungsfeld</b>               | <b>221</b> |
| 14.1       | Eigenschaften des elektrischen Strömungsfeldes              | 221        |
| 14.2       | Beschreibung des stationären elektrischen Strömungsfeldes   | 226        |
| 14.2.1     | Integrale Größen  | 226        |
| 14.2.2     | Ortsbezogene Größen   | 226        |
| 14.2.3     | Maschen- und Knotenpunktsatz im Strömungsfeld               | 231        |
| 14.2.4     | Überlagerung elektrischer Strömungsfelder                   | 234        |
| 14.3       | Berechnung elektrischer Strömungsfelder                     | 234        |
| 14.3.1     | Homogene und einfache inhomogene Strömungsfelder            | 234        |
| 14.3.2     | Radialsymmetrische Strömungsfelder                          | 236        |
| 14.4       | Erderanordnungen  | 241        |
| 14.4.1     | Halbkugelerder  | 241        |
| 14.4.2     | Vollkugelerder  | 245        |
| <br>       |   |            |
| <b>15</b>  | <b>Elektrostatistisches Feld</b>                            | <b>250</b> |
| 15.1       | Eigenschaften des elektrostatistischen Feldes               | 250        |
| 15.2       | Erscheinungsformen der Ladung                               | 251        |
| 15.3       | Beschreibung des elektrostatistischen Feldes                | 253        |
| 15.3.1     | Integrale Größen  | 253        |
| 15.3.2     | Ortsbezogene Größen   | 255        |
| 15.4       | Berechnung elektrostatistischer Felder                      | 257        |
| 15.4.1     | Homogene und einfache inhomogene elektrostatistische Felder | 257        |
| 15.4.2     | Elektrostatistische Felder im geschichteten Dielektrikum    | 258        |

|           |   |            |
|-----------|---|------------|
| 15.4.3    | Radialsymmetrische elektrostatische Felder .....        | 261        |
| 15.4.4    | Überlagerung elektrostatischer Felder .....             | 264        |
| 15.5      | Energie und Kräfte im elektrostatischen Feld .....      | 267        |
| 15.5.1    | Elektrostatisches Feld als Energiespeicher .....        | 267        |
| 15.5.2    | COULOMBSches Gesetz .....                               | 268        |
| 15.5.3    | Kraft auf Trennflächen .....                            | 269        |
| 15.5.4    | Influenz und Polarisierung .....                        | 272        |
| <b>16</b> | <b>Elektrisches Verhalten des Kondensators .....</b>    | <b>274</b> |
| 16.1      | Regeln zur Berechnung von Kondensatorschaltungen .....  | 274        |
| 16.1.1    | Reihenschaltung und kapazitiver Spannungsteiler .....   | 274        |
| 16.1.2    | Parallelschaltung und Ladungsteiler .....               | 277        |
| 16.1.3    | Gemischte Kondensatorschaltungen .....                  | 280        |
| 16.2      | Schaltvorgänge in RC-Kombinationen .....                | 281        |
| 16.2.1    | Ladevorgang .....                                       | 281        |
| 16.2.2    | Entladevorgang .....                                    | 283        |
| 16.2.3    | Umschalten vorgeladener Kondensatoren .....             | 285        |
| 16.3      | Ladungsausgleich .....                                  | 288        |
| 16.3.1    | Ladungsbilanz .....                                     | 288        |
| 16.3.2    | Ladungsausgleich in einer Reihenersatzschaltung .....   | 289        |
| 16.3.3    | Ladungsausgleich in einer Parallelersatzschaltung ..... | 294        |
| 16.3.4    | Kapazitive Netzwerke .....                              | 295        |
| <b>17</b> | <b>Stationäres magnetisches Feld .....</b>              | <b>298</b> |
| 17.1      | Eigenschaften des magnetischen Feldes .....             | 298        |
| 17.2      | Beschreibung des magnetischen Feldes .....              | 300        |
| 17.2.1    | Integrale Größen .....                                  | 300        |
| 17.2.2    | Ortsbezogene Größen .....                               | 302        |
| 17.3      | Magnetische Kreise .....                                | 304        |
| 17.3.1    | Magnetisierungskennlinie .....                          | 304        |
| 17.3.2    | Ersatzschaltungen für magnetische Kreise .....          | 307        |
| 17.3.3    | Berechnung magnetischer Kreise .....                    | 309        |
| 17.4      | Magnetische Felder stromdurchflossener Leiter .....     | 313        |
| 17.5      | Energie und Kräfte im magnetischen Feld .....           | 317        |
| 17.5.1    | Magnetische Energie .....                               | 317        |
| 17.5.2    | LORENTZ-Kraft .....                                     | 320        |
| 17.5.3    | Energiedichte und Induktivität einer Leitung .....      | 323        |
| <b>18</b> | <b>Zeitlich veränderliches magnetisches Feld .....</b>  | <b>326</b> |
| 18.1      | Elektromagnetische Induktion .....                      | 326        |
| 18.1.1    | Induktionsgesetz – Bewegungsinduktion .....             | 327        |
| 18.1.2    | Induktionsgesetz – Ruheinduktion .....                  | 331        |
| 18.2      | Selbstinduktion und Induktivität .....                  | 333        |

|           |  |            |
|-----------|--|------------|
| 18.3      | Gegeninduktion und Gegeninduktivität .....                         | 334        |
| 18.4      | Transformatorgleichungen .....                                     | 340        |
| <b>19</b> | <b>Elektrisches Verhalten der Spule .....</b>                      | <b>343</b> |
| 19.1      | Zusammenschaltung von Induktivitäten .....                         | 343        |
| 19.1.1    | Unverkoppelte Induktivitäten .....                                 | 343        |
| 19.1.2    | Verkoppelte Induktivitäten .....                                   | 344        |
| 19.1.3    | Transformator-Ersatzschaltungen .....                              | 345        |
| 19.2      | Schaltvorgänge an Spulen .....                                     | 348        |
| 19.2.1    | Einschaltvorgang .....   | 348        |
| 19.2.2    | Ausschaltvorgang .....   | 350        |
| 19.2.3    | Umschalten vormagnetisierter Spulen .....                          | 352        |
| 19.3      | Modelle zum Transformator .....                                    | 355        |
| 19.3.1    | Idealer Transformator .....  | 355        |
| 19.3.2    | Verlustloser und streuungsfreier Transformator .....               | 357        |
| 19.3.3    | Realer Transformator .....   | 359        |
| <b>20</b> | <b>Wechselwirkungen .....</b>                                      | <b>362</b> |
| 20.1      | Ladungsbewegungen in leitfähigen und nichtleitfähigen Medien ..... | 362        |
| 20.1.1    | Konvektionsstrom .....   | 362        |
| 20.1.2    | Feldstrom .....  | 363        |
| 20.1.3    | Diffusionsstrom .....  | 364        |
| 20.1.4    | Verschiebungsstrom .....   | 366        |
| 20.2      | MAXWELLSche Gleichungen .....                                      | 368        |
| 20.2.1    | Durchflutungsgesetz .....  | 368        |
| 20.2.2    | Induktionsgesetz .....   | 369        |
| 20.2.3    | Wirbelfreies Quellenfeld .....                                     | 370        |
| 20.3      | Wechselseitige Verkopplungen im elektromagnetischen Feld .....     | 371        |
| 20.3.1    | Wirbelverkopplungen bei Änderungen des magnetischen Flusses .....  | 371        |
| 20.3.2    | Wirbelverkopplungen bei schnellen Stromänderungen .....            | 372        |
| 20.3.3    | Parasitäre Effekte im HF-Bereich .....                             | 374        |
| 20.4      | Grundlegende Zusammenhänge .....                                   | 378        |
|           | <b>Übungsaufgaben .....</b>  | <b>379</b> |
|           | <b>Berechnungsbeispiele im Übungsbuch .....</b>                    | <b>402</b> |
|           | <b>Literaturverzeichnis .....</b>                                  | <b>407</b> |
|           | <b>Sachwortverzeichnis .....</b>                                   | <b>408</b> |
|           | <b>Formelzeichenverzeichnis</b>                                    |            |



# 1 Elektrische Grundgrößen

## 1.1 Elektrische Ladung

Die elektrische Ladung ist eine grundlegende Eigenschaft der Materie. Alle physikalischen Zustände, Prozesse und Erscheinungen, die in der Elektrotechnik auftreten, werden durch ruhende oder bewegte elektrische Ladungen verursacht.

Elektrische Ladungen sind Bestandteil aller Atome. Um den positiv geladenen Atomkern (Protonen) existiert eine negativ geladene Atomhülle, die mit  $n$  Elektronen besetzt ist. Diese beiden Elementarteilchen tragen eine vorzeichenbehaftete Elementarladung  $e_0$ .

- Proton: positive Ladung  $+e_0$
- Elektron: negative Ladung  $-e_0$

$$e_0 \approx 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ A}\cdot\text{s} \quad (1.1)$$

Ein Atom, dem aus seiner Umgebung keine Energie zugeführt wurde, erscheint für einen externen Beobachter elektrisch neutral. Die negative Ladung der Atomhülle hebt die positive Ladung des Atomkernes nach außen hin auf.

Bewegliche Ladungen entstehen in bestimmten Stoffen z.B. durch das Herauslösen von Elektronen aus der Atomhülle. Infolge der Zufuhr von Energie (z.B. Wärme) können Elektronen die Atomhülle verlassen und stehen dann als bewegliche Ladungsträger  $\ominus$  zur Verfügung. Das Atom besitzt in diesem Fall einen Überschuss an positiven Ladungen  $\oplus$  seines Kernes. Der Betrag jeder positiven oder negativen Ladung ist dann ein ganzzahliges Vielfaches  $n$  der Elementarladung  $e_0$  und wird als Ladungsmenge  $Q$  bezeichnet. Für die Einheit gilt:  $[Q] = 1 \text{ A}\cdot\text{s}$  (Amperesekunde).

$$|Q| = n \cdot e_0 \quad (1.2)$$

Jede Ladung versetzt den sie umgebenden Raum in einen besonderen Zustand. Sie bewirkt ein elektrisches Feld (Kap. 13 bis 15) und übt damit eine Kraft  $F \sim Q$  auf benachbarte Ladungen aus. Nach dem COULOMBSchen Gesetz (Abschn. 15.5.2) stoßen sich Ladungen gleicher Polarität voneinander ab, und Ladungen mit verschiedenen Vorzeichen ziehen sich gegenseitig an.

Ladungen können ruhen oder sich infolge der Kraftwirkung eines elektrischen Feldes bewegen. Ob sie sich bewegen können, und wie schnell sie sich bewegen, hängt von der sie umgebenden Materie ab.

Ruhende Ladungen erhält man z.B. durch Ladungstrennung auf den Oberflächen zweier durch einen Nichtleiter getrennter Metallplatten (vgl. Kap. 15).

Bewegliche Ladungen können gerichtet transportiert werden, wenn ein äußeres elektrisches Feld auf sie einwirkt (z.B. durch Anlegen einer Spannung an einen Leiter).

Die negativen Ladungen führen dann eine Bewegung relativ zu den positiven Ladungen aus.

Der jeweilige Zustand einer Ladung (Ruhe oder Bewegung) wird demzufolge neben der von außen zugeführten Energie durch das stoffliche Medium bestimmt, in dem sich die Ladung befindet bzw. das von den betrachteten Atomen gebildet wird. Solche stofflichen Medien können fest, flüssig oder gasförmig sein.

Die weiteren Ausführungen in diesem Lehrbuch beziehen sich auf Festkörper, die in der Regel bei Raumtemperatur betrachtet werden. Man unterscheidet zwischen folgenden Stoffen:

• **Elektrischer Leiter:**

Unter einem Leiter versteht man einen leitfähigen Stoff, der eine große Anzahl von beweglichen Elektronen enthält (z.B. Kupfer mit der Konzentration  $n_{\text{Cu}} \approx 9 \cdot 10^{22}$  Elektronen pro  $\text{cm}^3$ ). In metallischen Leitern sind die Elektronen nur sehr schwach im Atomverband gebunden, können sich leicht lösen und stehen somit in großer Anzahl als bewegliche Ladungsträger für einen Ladungstransport zur Verfügung.

In den weiteren Ausführungen der folgenden Kapitel zur Gleichstromlehre (außer in Kap. 6) werden ausschließlich metallische Leiter betrachtet.

• **Halbleiter:**

In einem Halbleiter ist die Anzahl der beweglichen Ladungen pro Volumeneinheit im Vergleich zum metallischen Leiter um Größenordnungen von bis zu  $10^{10}$  Elektronen /  $\text{cm}^3$  geringer. Durch den zielgerichteten Einbau von geeigneten Fremdatomen (Dotierung) kann diese Anzahl jedoch um Größenordnungen verändert werden.

Auf Leitungsmechanismen in Halbleitern kann in diesem Lehrbuch leider nicht eingegangen werden. Es wird auf die weiterführende Literatur (z.B. [11]) verwiesen.

• **Nichtleiter (Isolator):**

Ein idealer Nichtleiter besitzt keine frei beweglichen Ladungsträger. Somit ist ein Ladungstransport nicht möglich.

Bei realen Nichtleitern sind die Elektronen fest im Gitterverband verankert, solange sie nicht entsprechend hohen Temperaturen oder starken elektrischen Feldern ausgesetzt werden. Obwohl es demzufolge keine idealen Nichtleiter geben kann, geht man in ausgewählten Fällen von dieser idealen Eigenschaft aus (z.B. Kap. 15).

## 1.2 Elektrische Stromstärke

Die elektrische Stromstärke  $i$  beschreibt einen Ladungstransport pro Zeiteinheit.

$$i = \frac{dQ}{dt} \quad (1.3)$$

Wenn sich die Menge der transportierten Ladung über der Zeit ändert, so handelt es sich um einen zeitlich veränderlichen Strom  $i = f(t)$  mit der Einheit:  $[i] = 1 \text{ A (AMPERE)}$ . Er wird im

Weiteren, wie auch alle anderen von der Zeit abhängigen Größen, mit einem Kleinbuchstaben  $i$  gekennzeichnet.

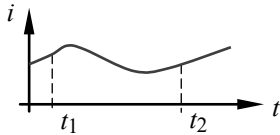


Bild 1.1: Zeitlich veränderlicher Strom

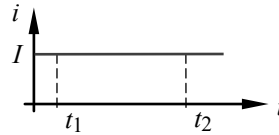


Bild 1.2: Gleichstrom

Betrachtet man einen veränderlichen Strom in einem zeitlichen Intervall (im Bild 1.1 von  $t_1$  bis  $t_2$ ), so ist die Fläche, die vom Funktionsverlauf  $i = f(t)$  gegen die Zeitachse eingeschlossen wird, ein Maß für die in diesem Zeitraum  $\Delta t$  transportierte Ladungsmenge  $\Delta Q$ :

$$\Delta Q = Q_2 - Q_1 = \int_{t_1}^{t_2} i \cdot dt \quad (1.4)$$

Wird über der Zeit eine konstante Ladungsmenge bewegt, so handelt es sich um einen zeitlich unabhängigen Strom  $i \neq f(t)$ . Dieser Gleichstrom wird mit einem großen Buchstaben  $I$  gekennzeichnet. Nach Gleich. (1.4) erhält man jetzt die transportierte Ladungsmenge  $\Delta Q$  folgende Aussage:

$$\Delta Q = Q_2 - Q_1 = \int_{t_1}^{t_2} I \cdot dt = I \cdot t_2 - I \cdot t_1 = I \cdot (t_2 - t_1) = I \cdot \Delta t$$

Der elektrische Strom ist an seinen drei Hauptwirkungen erkennbar:

- **Wärmewirkung:**

Beim Transport von Ladungsträgern durch den Querschnitt eines Leiters kommt es zu einer Erwärmung des Leiters. Mit zunehmender Dichte der Strömung (Stromdichte, vgl. Kap. 14) wird diese Erwärmung größer.

- **Magnetische Wirkung:**

Bewegte elektrische Ladungen erzeugen um sich herum ein magnetisches Feld (Kap. 17).

- **Chemische Wirkung:**

In flüssigen Leitern (Elektrolyte) fließt ein Ionenstrom. Dieser Ladungstransport ist zugleich ein Massetransport, der zu einer chemischen Beeinflussung des durchströmten Stoffes führt.

Der elektrische Strom ist mit Gleich. (1.3) noch nicht vollständig beschrieben. Die Angabe seines Wertes (Vorzeichen – Zahlenwert – Einheit) ist nur in Verbindung mit einer Richtungsangabe sinnvoll.

In metallischen Leitern können sich lediglich die Elektronen (negative Ladungsträger) bewegen. Im Falle einer Bewegung sind sie die „Träger“ des Stromes. Durch das Herauslösen aus dem Atomverband hinterlassen die Elektronen positive Metallionen. Diese positiven Ionisationszustände verlagern sich im Vergleich zur Bewegung der Elektronen in entgegengesetzter Richtung (Relativbewegung der positiven Ladungsträger – vgl. Bild 1.3).

Die Grundlage für eine einheitliche Richtungsangabe<sup>1)</sup> bildet der Richtungssinn des Stromes. Danach wird die Richtung des elektrischen Stromes mit  $I > 0$  A gegen die Bewegungsrichtung der Elektronen  $\ominus$  definiert und mit einem Richtungspfeil gekennzeichnet.

Nach dieser Festlegung fließt der Strom mit  $I > 0$  A außerhalb der Quelle vom höheren (+) zum niedrigeren (-) Energieniveau, also in Richtung der Relativbewegung  $- \rightarrow$  der positiven Ladungen  $\oplus$ . Ein Richtungspfeil gibt demzufolge die Richtung des Stromes an, mit der er mit positiven Werten durch einen Stromkreis fließt.

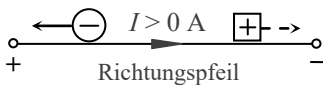


Bild 1.3: Richtungssinn des Stromes [Empfehlung nach DIN EN 60375]<sup>1)</sup>

In vielen Fällen kann diese Richtung aber nicht vorhergesagt werden. Das trifft insbesondere auf Brückenschaltungen (siehe Abschn. 4.3 und 4.4) und auf Stromkreise mit mehreren Quellen (vgl. Kap. 5) zu.

Falls die Potentialverhältnisse (vgl. Abschn. 1.3) in einem elektrischen Stromkreis (vgl. Abschn. 1.4) nicht bekannt sind, muss die Richtung eines Stromes vom Betrachter mit einem Bezugspfeil willkürlich festgelegt werden. Im Ergebnis einer Berechnung sagt das Vorzeichen des berechneten Stromes dann aus, ob er wirklich in die festgelegte Richtung fließt (positives Vorzeichen), oder ob er nicht in diese Richtung fließt (negatives Vorzeichen). Im Falle eines positiven Vorzeichens ist der Bezugspfeil zugleich der Richtungspfeil (Bild 1.3).

Obwohl Bezugspfeile beliebig festgelegt werden können, sollte man ihre Richtung während oder im Ergebnis einer Berechnung nicht mehr verändern. Da ein berechneter Strom (Vorzeichen – Zahlenwert – Einheit) nur in Verbindung mit dem festgelegten Bezugspfeil exakt interpretierbar ist, würde ein Richtungswechsel zu einer nicht nachvollziehbaren Lösung führen. Eine Aussage zum Richtungspfeil kann ja aus dem Vorzeichen des Rechenresultates im Zusammenhang mit dem Bezugspfeil abgeleitet werden.

In den weiteren Ausführungen dieses Lehrbuchs wird mit dem in der schaltungstechnischen Praxis üblichen Begriff „Zählpfeil“ gearbeitet. Darunter ist ein willkürlich festgelegter Bezugspfeil zu verstehen, der für die jeweils betrachtete Größe einen Bezugssinn vorgibt. Ein Strom wird nur dann als positiv angesehen, wenn der gewählte Bezugssinn (Zählpfeil) mit seinem Richtungssinn (siehe Richtungspfeil im Bild 1.3) übereinstimmt.

### Lehrbeispiel 1.1:

Wie viele Ladungsträger müssen bewegt werden, damit in einem Leiter eine Sekunde lang ein Strom von  $I = 1$  A fließt?

Da es sich um einen Gleichstrom handelt, gilt die Gleich. (1.3) wie folgt:

$$i = \frac{dQ}{dt} \quad \text{mit: } Q = \text{const.} \Rightarrow I = \frac{Q}{t}$$

$$\text{Durch Einsetzen von Gleich. (1.2) erhält man: } I = \frac{|Q|}{t} = \frac{n \cdot e_0}{t} \Rightarrow n = \frac{I \cdot t}{e_0} \approx 6,25 \cdot 10^{18}$$

Diese große Anzahl ist nicht mehr überschaubar. Um sich zumindest modellmäßig eine Vorstellung von der Menge der an diesem Ladungstransport beteiligten Ladungsträger zu verschaffen, werden folgende Überlegungen angestellt:

Welche Fläche könnte man überdecken, wenn jeder Ladungsträger die Größe eines Tennisballes mit einem Durchmesser  $\varnothing \approx 65 \text{ mm}$  hätte?

Zum Bedecken eines Quadratmeters sind ca. 225 Tennisbälle erforderlich. Unsere Erde hat eine Oberfläche von rund 500 Millionen Quadratkilometern ( $A \approx 5 \cdot 10^{14} \text{ m}^2$ ). Zum vollständigen Belegen der Erdoberfläche wären demzufolge ca.  $1,13 \cdot 10^{17}$  Tennisbälle nötig.

Für das Beispiel mit den  $n$  Ladungsträgern bedeutet dies, dass unsere Erde 55-mal mit einer solchen Schicht überzogen werden könnte oder dass diese 55 Schichten (übereinander angeordnet) einen Belag mit einer Höhe von ca. 4 m ergeben würden!

### 1.3 Elektrische Spannung

Einer Ladung kann an jedem Ort eines elektrischen Kreises (Abschn. 1.4) ein definiertes Energieniveau zugeordnet werden. Bezieht man das Energieniveau dieses Punktes auf die Ladung selbst, erhält man eine Aussage zum elektrischen Potential  $\varphi$ .

Das elektrische Potential  $\varphi$  ist ein Maß für das auf die Ladung bezogene Energieniveau eines Punktes in einem elektrischen Stromkreis.

Für einen Punkt a gilt:  $\varphi_a = \frac{W_a}{Q}$

Besitzt ein Punkt b ein von a verschiedenes Potential, so existiert zwischen den beiden Punkten eine Potentialdifferenz, die man als elektrische Spannung  $U$  bezeichnet. Für die Einheit gilt:  $[\varphi] = 1 \text{ V}$  und  $[U] = 1 \text{ V}$  (Volt).

Eine elektrische Spannung beschreibt die Differenz der Potentiale zweier Punkte in einem elektrischen Stromkreis.

Für eine Gleichspannung  $u \neq f(t)$  zwischen den Punkten a und b ( $U_{ab}$ ) gilt dann:

$$U_{ab} = \varphi_a - \varphi_b \quad (1.5)$$

Zur vollständigen Beschreibung der Spannung ist eine Richtungsangabe erforderlich. Die Spannung wird mit einem Spannungspfeil gekennzeichnet, der z.B. vom Punkt a zum Punkt b festgelegt wurde. Besitzt nun der Punkt b ein höheres Potential als der Punkt a, so wird die Spannung gemäß Gleich. (1.5) negativ. Dieses negative Vorzeichen signalisiert den Sachverhalt, dass die Spannung  $U_{ab}$  nicht vom Punkt a zum Punkt b (sondern von b nach a) mit einem positiven Wert  $U_{ba} = -U_{ab}$  abfällt.

## 1.4 Elektrischer Gleichstromkreis

In einem leitfähigen Medium fließt ein elektrischer Strom, wenn den beweglichen Ladungsträgern durch eine Quelle Energie zugeführt wird und die Anordnung in sich geschlossen ist (Stromkreis). Zur Verdeutlichung dieses Sachverhaltes soll zunächst ein unverzweigter elektrischer Stromkreis betrachtet werden. Er besteht im Elementarfall aus einer elektrischen Quelle und einem Verbraucher (Grundstromkreis).

Zwischen zwei Punkten a und b soll sich eine (vorerst als ideal angenommene) elektrische Quelle EQ befinden, die eine Quellenspannung  $U_q > 0 \text{ V}$  (siehe Zählpfeil im Bild 1.4) bereitstellt. Dann liegen die Punkte a und b auf den Potentialen  $\varphi_a$  und  $\varphi_b$  mit  $\varphi_a > \varphi_b$ .

Es gilt:  $U_q = U_{ab} = \varphi_a - \varphi_b$ .

In diesem Zusammenhang muss darauf verwiesen werden, dass der Wert des Potentials eines Punktes lediglich eine Aussage relativ zum Potential eines frei wählbaren Bezugspunktes liefert. Diesem Bezugspunkt PB ordnet man ein Bezugspotential (z.B.  $\varphi_{PB} = 0 \text{ V}$ ) zu.

Wenn nun die Lage des Bezugspunktes oder das Bezugspotential selbst verändert wird, ändern sich die Potentiale aller betrachteten Punkte. Die Potentialdifferenzen (Spannungen) zwischen jeweils zwei Punkten bleiben aber unverändert.

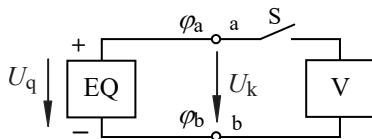


Bild 1.4: Offener elektrischer Kreis

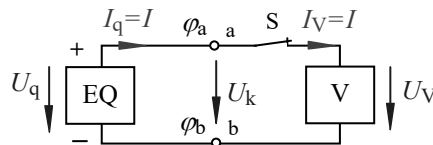


Bild 1.5: Geschlossener elektrischer Stromkreis

Bei geöffnetem Schalter S (Bild 1.4) fließt kein Strom durch den Kreis. Zwischen den Klemmen a und b liegt eine Klemmenspannung  $U_k$ , die im Bild 1.4 gleich der Quellenspannung  $U_q$  ist. Die Spannung über dem Verbraucher V ist null.

Nun wird der Kreis über den Schalter S geschlossen (Bild 1.5).

Die Quelle treibt jetzt einen Quellenstrom  $I_q = I$  vom höheren ( $\varphi_a$ ) zum niedrigeren Potential ( $\varphi_b$ ) durch den geschlossenen elektrischen Stromkreis. In einem unverzweigten elektrischen Stromkreis fließt nur ein Strom. Dieser Strom  $I_V = I$  verursacht einen Spannungsabfall  $U_V$  über dem Verbraucher, der in Richtung des fließenden Stromes weist.

Im Bild 1.6 ist ein einfaches Modell für den Ladungstransport in einem Gleichstromkreis dargestellt. Es soll zeigen, dass der elektrische Strom eine in sich geschlossene Erscheinung ist. Er wird zwar von einer elektrischen Quelle (EQ) verursacht – er selbst hat aber kein Anfang und kein Ende.

Eine bewegte Ladung verliert längs des Ladungstransportes durch einen geschlossenen Stromkreis einen Teil ihrer potentiellen Energie. Diese Energie wird der Ladung von der elektrischen Quelle wieder zugeführt. Der elektrische Strom fließt dabei in seinem geschlossenen Umlauf kontinuierlich weiter (Kontinuität des Stromes).

Zur Erläuterung dieses Sachverhaltes wird davon ausgegangen, dass eine positive Ladung im Punkt a des Bildes 1.6 ihr höchstes Energieniveau ( $W_a$ ) aufweist. Längs des Ladungstransportes (siehe Richtungspfeil des Stromes) sinkt das Energieniveau dieser Ladung in Richtung des Punktes b ab. Dieses Absinken ( $W \downarrow$ ) soll mit dem rechten Füllstandsanzeiger modellmäßig nachgebildet werden.

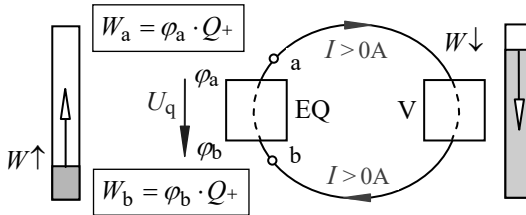


Bild 1.6: Modell zum Gleichstromkreis ( $U_q > 0V$ )

Im Punkt b besitzt die betrachtete Ladung ihr geringstes Energieniveau. Längs dieses Ladungstransportes hat sich demzufolge nicht die Ladungsmenge verringert, sondern ihr Energieniveau ist abgesunken. Der links im Bild 1.6 dargestellte Füllstandsanzeiger soll die Arbeitsweise der Quelle modellmäßig nachbilden. Sie hebt das Energieniveau der Ladung von  $W_b$  auf den ursprünglichen Wert  $W_a$  an ( $W \uparrow$ ). Dabei muss der Strom als in sich geschlossene Erscheinung auch durch die Quelle fließen.

Im Bild 1.7 ist noch einmal der geschlossene elektrische Stromkreis des Bildes 1.5 in vereinfachter Form dargestellt. Für den elektrischen Strom gilt:  $I_q = I_V = I$ .

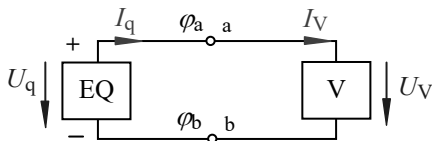


Bild 1.7: Zählpfeile im elektrischen Stromkreis

ÜB: BB 1.3

Bei der Interpretation der Richtungen der Zählpfeile stellt man folgendes fest:

Die Zählpfeile von Spannung und Strom weisen an der Quelle (Bild 1.7 – links) eine entgegengesetzte Richtung zueinander auf. Die Zählpfeile von Spannung und Strom zeigen dagegen am Verbraucher (Bild 1.7 – rechts) in die gleiche Richtung. Es muss demzufolge zwischen zwei verschiedenen Zählpfeilsystemen unterschieden werden:

#### • Quellen-Zählpfeilsystem:

Wenn die Zuordnung der Zählpfeile von Spannung und Strom eine entgegengesetzte Richtung aufweisen (siehe Bild 1.8), so wird dieser schaltungstechnische Zustand nach Vorbild einer aktiven elektrischen Quelle im Quellen-Zählpfeilsystem dargestellt.

Im Bild 1.8 ist der Quellenstrom  $I_q$  gegen den Zählpfeil der Quellenspannung  $U_q$  gerichtet. Die Quelle gibt Leistung an den Verbraucher ab (und wirkt damit als Quelle), wenn der Strom mit  $I_q > 0$  A vom höheren Potential der Quelle durch einen außen angeschlossenen Verbraucher zum niedrigeren Potential der Quelle fließt. Wenn das nicht ( $I_q < 0$  A) der Fall

ist, dann nimmt die Quelle Leistung auf und wirkt als Verbraucher. Das ist allerdings in der hier angenommenen Situation nicht möglich.

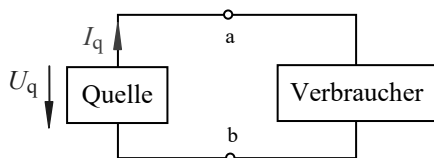


Bild 1.8: Quellen-Zählpeilsystem

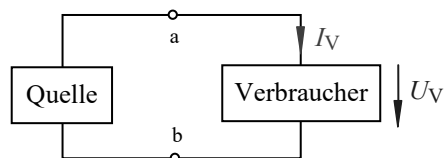


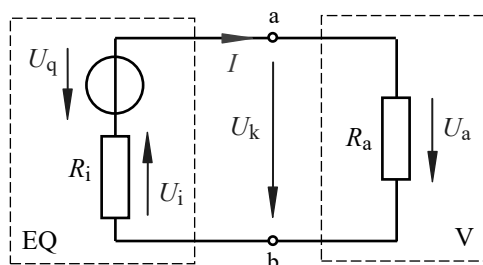
Bild 1.9: Verbraucher-Zählpeilsystem

### • Verbraucher-Zählpeilsystem:

Wenn die Zuordnung der Zählpeile von Spannung und Strom die gleiche Richtung aufweisen (siehe Bild 1.9), so wird dieser schaltungstechnische Zustand im Verbraucher-Zählpeilsystem dargestellt. Danach hat der Strom durch den Verbraucher  $I_V$  die gleiche Richtung wie der Zählpeil der Verbraucherspannung  $U_V$  (siehe Bild 1.7 – rechts und Bild 1.9), da ein Strom durch einen Verbraucher einen Spannungsabfall in Flussrichtung verursacht. In diesem Fall nimmt das betrachtete Element Leistung auf und wirkt als Verbraucher.

Nun sollen die in den Bildern 1.4 bis 1.9 vorgestellten Modelle im Zusammenhang mit den getroffenen Festlegungen in eine einfache schaltungstechnische Situation umgesetzt werden. Die Anordnung besteht jetzt aus einer realen linearen Spannungsquelle und einem Lastwiderstand als Verbraucher. Beide Elemente werden an den Punkten a und b zu einem unverzweigten elektrischen Stromkreis (siehe Bild 1.10) verknüpft.

Die elektrische Quelle (EQ) ist der aktive Teil dieses elektrischen Stromkreises. Ladungstrennende Kräfte im Inneren dieses Schaltelementes erzeugen eine Quellenspannung  $U_q$  und versetzen elektrische Ladungen in diesem geschlossenen Stromkreis in eine Bewegung relativ zueinander. Solche inneren Vorgänge sind mit Verlusten behaftet, die bei einer linearen Quelle durch einen ohmschen Widerstand (Innenwiderstand  $R_i$  im Bild 1.10) nachgebildet werden.



ÜB: BB 1.4

Bild 1.10: Unverzweigter elektrischer Stromkreis

Der Verbraucher (V) als der passive Teil eines elektrischen Stromkreises soll in den folgenden Betrachtungen ein linearer ohmscher Widerstand  $R_a$  sein (vgl. Abschn. 1.5 und 2.1). Er setzt die ihm zugeführte Energie in Wärme um. Die Verbindungsleitungen zwischen Quelle und Verbraucher werden als widerstandslos angenommen.



Bei einem offenen Kreis (Trennung der beiden Elemente an den Punkten a und/oder b) fließt kein Strom und der Spannungsabfall  $U_i$  über dem Innenwiderstand ist null. Über dem Lastwiderstand kann dann natürlich auch keine Spannung abfallen. Die Klemmenspannung  $U_k$  ist in diesem Fall gleich der Quellenspannung  $U_q$ .

Wird nun der Stromkreis geschlossen (Verbindung der beiden Elemente über die Punkte a und b), so fließt ein Strom  $I$  durch die Widerstände  $R_a$  und  $R_i$ .

In einem unverzweigten elektrischen Stromkreis kann nur ein Strom fließen.

Über beiden Widerständen fällt infolge dieses Stromflusses eine Spannung ( $U_a$  bzw.  $U_i$ ) ab. Die Klemmenspannung  $U_k$  ist jetzt gleich dem Spannungsabfall  $U_a$ .

Es gilt:  $U_k = U_a = U_q - U_i$ .

Für die Spannungsquelle gilt das Quellen-Zählpfeilsystem, da die Zählpfeile von  $U_q$  und  $I$  eine entgegengesetzte Richtung aufweisen. Die Quelle gibt Leistung an die angeschlossenen Elemente ab.

Für den Innenwiderstand der Spannungsquelle  $R_i$  und für den Lastwiderstand  $R_a$  gilt das Verbraucher-Zählpfeilsystem, da die Zählpfeile von  $U_i$  und  $I$  sowie von  $U_a$  und  $I$  jeweils die gleiche Richtung aufweisen. Beide Widerstände nehmen Leistung von der Quelle auf. Der in der Praxis in der Regel nicht vernachlässigbare Innenwiderstand  $R_i$  einer elektrischen Quelle wirkt demzufolge innerhalb dieser Quelle als Verbraucher.

## 1.5 Widerstände im elektrischen Stromkreis

### 1.5.1 Bemessungsgleichung

Der ohmsche Widerstand  $R$  (vgl. auch Abschn. 2.1) beschreibt die Fähigkeit eines stofflichen Gebildes zur Begrenzung des elektrischen Stromes  $I$ . Zur Diskussion von Einflussgrößen auf diese Begrenzereigenschaft soll eine Strömung durch ein Stück Manganindraht (homogener Widerstandswerkstoff) betrachtet werden (Bild 1.11).

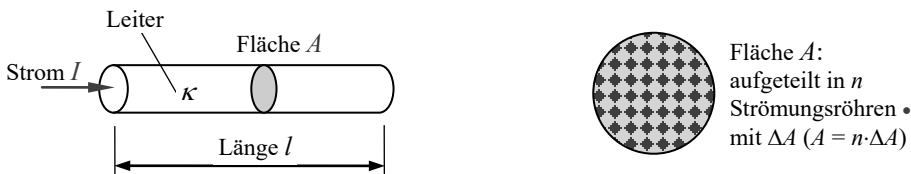


Bild 1.11: Einflussgrößen zur Begrenzung des elektrischen Stromes  $I$

ÜB: BB 1.1

Das stoffliche Gebilde besitzt eine spezifische elektrische Leitfähigkeit  $\kappa$  und ist durch seine konstruktiven Daten (Länge  $l$  und Querschnitt  $A$ ) gekennzeichnet. Die spezifische elektrische Leitfähigkeit  $\kappa$  ist eine Werkstoffkenngröße und wird durch die Dichte der frei beweglichen Ladungsträger und durch ihre Beweglichkeit im Werkstoff bestimmt. Der Kehrwert der elektrischen Leitfähigkeit ist der spezifische elektrische Widerstand  $\rho$ .

Es gilt:  $\kappa = \frac{1}{\rho}$  mit:  $[\kappa] = 1 \frac{\text{m}}{\Omega \cdot \text{mm}^2}$  oder:  $[\kappa] = 1 \frac{\text{S}}{\text{m}}$

Der Strom durch den Leiter im Bild 1.11 wird durch folgende Maßnahmen begrenzt:

- Verringerung der Dichte der beweglichen Ladungsträger und ihrer Beweglichkeit:

Dazu muss ein Werkstoff mit einer kleineren spezifischen elektrischen Leitfähigkeit  $\kappa$  (also ein „schlechterer“ Leiter) verwendet werden:  $\kappa \downarrow \Rightarrow R \uparrow$ .

- Vergrößerung der Länge  $l$  des Leiters:

Eine größere Länge des Drahtes setzt dem Stromfluss einen größeren Widerstand entgegen. Die Ladungsträger müssen einen längeren Weg zurücklegen:  $l \uparrow \Rightarrow R \uparrow$ .

- Verringerung des Leiterquerschnittes:

Eine Reduzierung der Fläche  $A$  bewirkt eine Verringerung der Anzahl  $n$  der verfügbaren Strömungsröhren (Bild 1.11 – rechts) und damit eine Strombegrenzung. Der Widerstand des Leiters steigt in diesem Fall an:  $A \downarrow \Rightarrow R \uparrow$ .

Daraus ergibt sich die Bemessungsgleichung zur Bestimmung des Widerstandes einer homogenen leitfähigen Anordnung:

$$R = \frac{l}{\kappa \cdot A} = \rho \cdot \frac{l}{A} \quad (1.6)$$

Der ohmsche Widerstand  $R$  ist eine Bauelemente-Kenngröße, die von den konstruktiven Daten (Länge und Fläche) und von der Materialkenngröße ( $\kappa = 1/\rho$ ) abhängig ist.

Der elektrische Leitwert  $G$  wird über den Kehrwert des ohmschen Widerstandes  $R$  bestimmt.

$$G = \frac{1}{R} = \frac{\kappa \cdot A}{l} \quad (1.7)$$

Der Leitwert wird in der Praxis als reine Rechengröße verwendet. Die primären Informationen über die Einsetzbarkeit des Bauelementes „Widerstand“ leitet der Schaltungstechniker vorrangig aus der Angabe des Widerstandswertes ab. Aus diesem Grund wird in den folgenden Ausführungen weitgehend auf Leitwertbetrachtungen verzichtet.

Für die Einheiten gilt:  $[R] = 1 \Omega$  (OHM) und:  $[G] = 1 \text{ S}$  (SIEMENS).

### 1.5.2 Temperaturabhängigkeit

ÜB: BB 1.5

Bei Leiterwerkstoffen äußert sich eine Temperaturänderung über eine nachweisbare Widerstandsänderung des Stoffes. Der Temperaturkoeffizient  $\alpha$  ist ein Maß dafür. Er beschreibt als Werkstoffkenngröße die auf den Widerstandswert des Stoffes bei Raumtemperatur bezogene Widerstandsänderung pro Temperaturänderung. Bei metallischen Werkstoffen ist der Temperaturkoeffizient größer als null (vgl. auch [11] – LB 2.3).

## Sachwortverzeichnis

- Abfallflanke 334, 339, 352  
 Admittanz 130  
 Amplitude 102, 195  
 Amplitudenfrequenzgang 156, 170f  
 Amplitudenspektrum 104  
 Analogiemethode 219  
 Analyseverfahren 76, 153  
 Anpassungsfall 45  
 Anstiegsflanke 334, 339, 352  
 Äquipotentialfläche 222, 237, 265  
 Äquipotentiallinie 222, 241, 253  
 Äquivalenz, schaltungstechnische 60  
 Arbeitspunkt 23, 91, 310  
 ARON-Schaltung 207  
 Atom 12  
 Augenblickswert 95, 187  
 Ausgleichsstrom 292  
 Ausschaltvorgang 350
- Bandbreite** 165  
**Bandpass** 164  
**Bandsperre** 164  
 Bauelement, nichtlineares 84  
 Bauelement, reales 110  
 Bauelemente-Kenngröße 23, 226, 253, 317, 333, 337  
 Baum, vollständiger 65  
 Baumzweig 77  
 Bemessungsgleichung 20f  
 Betriebskapazität 179  
 Betriebsparameter 137  
 Beweglichkeit 21  
 Bewegungsinduktion 327  
 Bezugsknoten 81, 296  
 Bezugspfeil 15  
 Bezugsphase 207  
 Bezugspotential 17, 80  
 Bezugstemperatur 22  
 Bezugszeiger 116  
 Bezugszeitpunkt 95, 116, 196  
 Bildbereich 122, 149, 189  
 Blindleistung 188, 355  
 Blindleistungskompensation 193  
 Blindspannung 190  
 Blindstrom 191  
 Blindwiderstand, indukt. 107, 140, 168, 360  
 Blindwiderstand, kapazitiver 109, 132, 168  
 Brechungsgesetz 261  
 Brücke, abgleichbare 143  
 Brücke, nicht abgleichbare 143
- Brückenschaltung 56, 118  
**COULOMB-Kraft** 268, 327  
**COULOMBSches Gesetz** 268
- Dämpfungskonstante** 181  
 Darstellung, normierte 48  
 Deformationspolarisation 272  
 Dezibel 173  
 Dielektrikum 250, 268, 354  
 Dielektrikum, geschichtetes 257  
 Differenzierglied 287  
 Diffusionsstrom 352  
 Diffusionsstromdichte 353  
 Diode 85  
 Dipol 273  
 Drehstromgenerator 195  
 Dreieckschaltung 61, 200  
 Dreieck-Stern-Transformation 61  
 Dreileiternetz 209  
 Dreiphasensystem 195  
 Dreipolschaltung 59  
 Driftgeschwindigkeit 350  
 Driftgeschwindigkeit, mittlere 229  
 Durchbruchspannung 86  
 Durchflutung 300, 304, 307, 357  
 Durchflutungsgesetz 302, 310, 356  
 Durchlassbereich 164  
 Durchlassspannung 85  
 Durchlassstrom 86
- Ebene, komplexe** 122  
 Effektivwert 99, 104, 116, 127, 186  
 Effektivwertzeiger 127  
 Eindringtiefe 373  
 Einschaltvorgang 348  
 Einstellwiderstand 22  
 Eisenkern 310  
 Eisenverluste 110, 360  
 Eisenweglänge 312  
 Elektrode 221, 233, 236  
 Elementarladung 12  
 Elementarmagnete 305  
 Elementarschaltung 32  
 Elementarvierpol 177  
 Energie 28  
 Energie, elektrische 268  
 Energie, gespeicherte 267, 270, 318  
 Energie, magnetische 317, 324  
 Energiedichte 268, 271, 323  
 Energierhaltungssatz 29

- Energieniveau 16, 254  
 Energiesatz 28  
 Energiespeicher 267, 318  
 Entladestrom 268, 281  
 Entladevorgang 283  
 Erder, virtueller 246  
 Erderanordnung 241  
 Erregerstrom 301, 336  
 Erregerstrom, periodischer 333  
 Erregerwicklung 326  
 Ersatzinduktivität 346  
 Ersatz-Kennlinie 89  
 Ersatzschaltbild, reduziertes 361  
 Ersatzschaltung 90, 328  
 Ersatzschaltung, magnetische 301, 307  
 Erzeuger-Zählpeilsystem 331, 333  
 Exponentialform 123, 128, 144, 190  
  
 FARADAYScher Käfig 272  
 Fehler, unsymmetrischer 209, 211  
 Feld, elektrostatisches 250  
 Feld, homogenes 216  
 Feld, homogenes elektrost. 253, 257, 269  
 Feld, homogenes magnetisches 309, 328  
 Feld, inhomogenes 217  
 Feld, inhomogenes elektrostatisches 257  
 Feld, inhomogenes magnetisches 321  
 Feld, kugelsymmetrisches 261  
 Feld, radialsymmetrisches 217, 236  
 Feld, radialsymmetrisches elektrost. 261  
 Feld, stationäres magnetisches 298  
 Feld, zeitlich veränderliches magnet. 326  
 Feld, zylindersymmetrisches 263  
 Feldbegriff 214  
 Feldbild 215  
 Feldgröße, skalare 216, 226  
 Feldgröße, vektorielle 226  
 Feldkonstante, elektrische 250  
 Feldkonstante, magnetische 299  
 Feldpunkt 214, 228, 249, 271  
 Feldraum, passiver 221  
 Feldstärke, elektrische 227, 242, 255, 272, 352  
 Feldstärke, magnetische 298, 305, 313, 356  
 Feldstärkeberechnung 248  
 Feldstärkevektor 234  
 Feldstrom 351  
 Feldvektoren 378  
 Festwiderstand 22  
 Filter-Flankensteilheit 173  
 Flächenladung 252  
 Flächenladungsdichte 252, 255, 355  
  
 Flächenverhältnis 312  
 Fluss, elektrischer 253, 354  
 Fluss, magnetischer 301, 307, 317, 323, 331, 336, 360  
 Fluss, verketteter 317  
 Fluss, zeitlich veränderlicher magn. 333  
 Flussdichte, elektrische 255  
 Flussdichte, magn. 303, 311, 320, 327f, 357  
 Flussdichtelinie 327  
 Flussdichtelinie, elektrische 358  
 Flussdichtevektor 320  
 Flusslinie 313  
 Flusslinie, elektrische 253, 354  
 Flussröhre 268, 303  
 Flussröhre, magnetische 298, 308  
 Flussverbreiterung 311  
 Form, kartesische 122  
 Form, trigonometrische 123  
 FOURIER -Reihe 103  
 FOURIER-Koeffizient 103  
 Frequenz 94, 195  
 Frequenz, imaginäre 156  
 Frequenz, normierte 171  
 Frequenzabhängigkeit 156  
 Frequenzdekade 170  
 Frequenzgang 107, 375  
 Frequenzgang, komplexer 156  
  
 Galvanometer 57  
 Gamma-Vierpol 178, 180  
 GAUßscher Satz 358  
 Gegenelektrode 237  
 Gegeninduktion 334  
 Gegeninduktionsspannung 335, 338, 341  
 Gegeninduktivität 334, 357  
 Gegenladung 250, 261  
 Gegensystem 209  
 Generatorstränge 195  
 Generator-Strangspannung 196  
 Gesamtfluss 335  
 Geschwindigkeitsvektor 321  
 Gleichanteil 97  
 Gleichgröße 94  
 Gleichrichtwert 97  
 Gleichspannung 16  
 Gleichstrom 14, 31  
 Gleichstromkreis 17  
 Gleichstromwiderstand 23, 85  
 Gradient 227, 351  
 Graph 65  
 Grenzfrequenz 142, 157, 165  
 Größe, integrale 219, 226, 253, 300

- Größe, ortsbezogene 219, 226, 255, 302  
 Grunddämpfung 157  
 Grundfrequenz 103  
 Grundschiwingung 103  
 Grundstromkreis 31, 44  
 Grundwelle 103  
 Güte 111, 113, 163, 166, 376  
**H**  
 Halbkugelerder 241  
 Halbleiter 13  
 HALL-Konstante 323  
 HALL-Sonde 305, 322  
 HALL-Spannung 323  
 Harmonische 103  
 Hauptfluss 335  
 Hauptinduktivität 361  
 Heißeiter 87  
 HELMHOLTZscher Überlagerungssatz 68, 149f  
 HF-Ersatzschaltbild 374  
 Hochpass 160  
 Hohlleiter 314  
 HOPKINSONSches Gesetz 301, 311, 333  
 Hüllenintegral 233, 357  
**I**  
 Imaginärteil 122, 140, 144, 157  
 Impedanz 128  
 Indikatorzweig 144  
 Induktion, elektromagnetische 326  
 Induktionsgesetz 327, 349, 369, 371  
 Induktivität 107, 129, 317, 323, 333, 335  
 Induktivität, äußere 325  
 Induktivität, innere 324  
 Induktivität, unverkoppelte 343  
 Induktivität, verkoppelte 344  
 Induktivitätsbelag 179  
 Induktivitätsmessbrücke 145  
 Influenz 272  
 Innenwiderstand 19, 52, 71, 152  
 Integrierglied 287  
 Inversbetrieb 176  
 Inversion 135  
 Inversionskreis 135  
 Inversionsregeln 139  
 Ionenpolarisation 273  
**K**  
 Kaltleiter 88  
 Kapazität 109, 262, 267  
 Kapazitätsbelag 179  
 Kapazitätsmessbrücke 146  
 Kennlinie 54  
 Kennlinie, idealisierte 90  
 Kennwiderstand 163  
 Kettenschaltung 175  
 Ketten-Zählpfeilsystem 174, 359  
 KIRCHHOFFSche Sätze 26, 65, 120, 132, 149  
 Klemmenspannung 17, 40, 328  
 Klemmenverhalten 40  
 Klirrfaktor 105  
 Knoten 26  
 Knoten, echter 32  
 Knoten, virtueller 33, 296  
 Knotenanalyse 80, 154, 295  
 Knotenkapazität 296  
 Knotenleitwert 81  
 Knotenpotentialanalyse 80  
 Knotenpotentialverfahren 153  
 Knotenpunkt 27, 32  
 Knotenpunktsatz 27, 35, 65, 89, 132, 201, 277, 308, 343  
 Koaxialleitung 315  
 Koeffizientenschema 77, 81, 154, 296  
 Koerzitivfeldstärke 307  
 Kompensatorschaltung 56  
 Komponenten-Ersatzschaltungen 212  
 Komponenten, symmetrische 209  
 Kondensator 130, 274, 354  
 Kondensator, realer 112  
 Kondensator, vorgeladener 285  
 Kondensatorschaltung 274  
 Kondensatorschaltung, gemischte 280  
 Konduktanz 131  
 Konstantandraht 22  
 Kontinuität 17, 233, 350  
 Kontinuitätsgleichung 350, 355f, 378  
 Kontinuitätssatz 233, 370  
 Konvektionsstrom 350, 353, 362  
 Konvektionsstromdichte 363  
 Konzentrationsgefälle 351  
 Koppelkapazität 296  
 Koppelleitwert 81  
 Koppelwiderstand 78  
 Kopplungsfaktor 335, 344, 357  
 Kraft 269  
 Kreis, magnetischer 304  
 Kreis, unverzweigter magnetischer 307  
 Kreis, verkoppelter magnetischer 335  
 Kreis, verzweigter magnetischer 308  
 Kreisfrequenz 95, 116  
 Kugelkondensator 262  
 Kurzschluss, einsträngiger 213  
 Kurzschlussfall 44  
 Kurzschlussstrom 73, 91, 152, 213  
 Kurzschlussstromrückwirkung 176  
 Kurzschlussübertragungswiderstand 175  
 Kurzschlusszweig 32

- Ladestrom 267, 281  
Ladevorgang 281  
Ladezustand 288  
Ladung 12f, 218, 250, 296, 320  
Ladung, bewegte 327  
Ladung, verschobene 289  
Ladungsausgleich 288  
Ladungsbewegung 362  
Ladungsbilanz 288  
Ladungserhaltungssatz 252  
Ladungsgesetz 253, 262, 274  
Ladungsmenge 14  
Ladungsteilerregel 279  
Ladungsträgerbeweglichkeit 229, 352  
Ladungsträgerkonzentration 352, 353  
Ladungstransport 17, 25, 350  
Ladungstrennung 327, 350  
Ladungszufluss 354  
Längszweig 177  
Lastfälle 44  
Lastkennlinie 91  
Lastwiderstand 31, 71, 356  
Lastwiderstandsgerade 47  
Lastzweipol, komplexer 186  
Leerlauf 44  
Leerlaufspannung 71, 91, 152  
Leerlaufspannungsrückwirkung 175  
Leerlaufübertragungsleitwert 175  
Leistung 44, 186  
Leistung, elektrische 29  
Leistung, komplexe 189, 204, 356  
Leistungsaufnahme, maximale 46  
Leistungsbilanz 29  
Leistungsdichte 230  
Leistungsfaktor 191  
Leistungsfluss 186, 196, 199  
Leistungstransformator 355  
Leistungsumsatz 44  
Leiter 13  
Leiter, elektrischer 13  
Leiter, stromdurchflossener 298, 313  
Leiterlänge, wirksame 321, 331  
Leiterschleife 299, 327, 330  
Leiterspannung 196  
Leiterstab 326  
Leiterstrom 198, 202  
Leitfähigkeit, spezifische elektr. 20, 221, 352  
Leitung 179  
Leitungselement, differenzielles 180  
Leitungsgleichungen 182  
Leitwert 21  
Leitwert, komplexer 130, 138  
Leitwert, magnetischer 300  
Leitwertbelag 179  
LENZsche Regel 332  
Linendiagramm 95  
Linienintegral 232  
Linienladung 252, 265  
Linienladungsdichte 252  
Linkssystem 210  
LORENTZ-Kraft 320, 327  
Lösung, grafische 135  
Luftspalt 310  
Luftspaltgerade 310  
Luftspule 300  
**Magnetisierungskennlinie** 304, 310  
Magnetisierungsstrom 361  
Masche, abhängige 65  
Masche, unabhängige 65  
Maschensatz 26, 33, 65, 89, 113, 132, 148, 152, 197, 232, 274, 311, 342  
Maschenstrom 76, 153  
Maschenstromanalyse 76, 153  
Maschenumlauf 26  
Maschenwiderstand 78  
Massivleiter 313  
Maximalwert 95, 107, 116, 186  
Maximalwertzeiger 127  
MAXWELLSche Gleichungen 356, 359, 378  
MAXWELL-WIEN-Brücke 145  
Messtechnik 52  
Messung, spannungsrichtige 55  
Messung, stromrichtige 54  
Messwerk 52  
Metallfaden-Glühlampe 85, 88  
Mischgröße 94  
Mitsystem 209  
Mittelpunktleiter 195  
Mittelwert 97  
Mittelwert, arithmetischer 97  
Mittelwert, quadratischer 99  
  
Nebenwiderstand 53  
Netzwerk, kapazitives 295  
Netzwerk, lineares 65  
Netzwerkberechnung 65, 149  
NF-Ersatzschaltbild 110  
Nichtleiter 13  
Nichtlinearitätskoeffizient 86  
Normalkomponente 260  
Normalwiderstand 57  
Nulldurchgang 101  
Nullimpedanz 212

- Nullindikator 56  
 Nullkomponente 210  
 Nullsystem 210  
 Nullphasenwinkel 95  
**Oberschwingung** 103  
 OHMSches Gesetz 23, 230  
 Oktavabstand 170  
 Orientierungspolarisation 273  
 Ortskurve 137, 140, 157, 173  
**Parallelschaltung** 32, 35, 131, 191, 277, 343  
 Parallelschaltung, gleichsinnige 345  
 Parallelschwingkreis 114, 162  
 Pegel 173  
 Periodendauer 94  
 Permeabilität 299, 311  
 Permeabilität, relative 299  
 Permittivität 250  
 Permittivität, relative 250  
 Phasendrehbrücke 147  
 Phasenfrequenzgang 156, 172  
 Phasenkonstante 181  
 Phasenoperator 196  
 Phasenrelationen 132  
 Phasenspektrum 105  
 Phasenwinkel 106, 123, 129, 145, 166  
 Plattenkondensator 257  
 Polarisation 272  
 Polarisationsverluste 112  
 Potential 16f, 144, 224, 226, 231  
 Potential, elektrisches 80  
 Potentialänderung 227  
 Potentialberechnung 247  
 Potentialbezugspunkt 227, 263  
 Potentialdifferenz 16, 323  
 Potentialfeld, elektrisches 218, 356  
 Potentialgefälle 225, 245, 351  
 Pressmassekern 319  
 Primärspule 340  
 Prinzipzeigerbild 116  
 Punktladung 251, 262  
**Quelle, elektrische** 40  
 Quellen-Charakteristik 359  
 Quellenfeld 217  
 Quellenfeld, wirbelfreies 358f, 370  
 Quellenfreiheit 368  
 Quellenkennlinie 41, 47, 91  
 Quellenleistung 30, 40  
 Quellenspannung 17, 78  
 Quellen-Zählpfeilsystem 18, 29, 40, 268, 301, 318  
 Querstrom 50  
 Querzweig 57, 118, 143, 177  
**Raumladung** 251, 255, 350  
 Raumladungsdichte 229, 251, 363, 365  
 RC-Hochpass 161  
 RC-Kombination 158, 281  
 RC-Phasenschiebekette 142, 155  
 RC-Tiefpass 158  
 Reaktanz 128  
 Realteil 122, 140, 144, 157  
 Rechteck-Impulsfolge, periodische 105  
 Rechteck-Impulsfolge, positive 354  
 Rechtsschrauben-Regel 301, 320, 331, 337, 371  
 Rechtssystem 209, 215  
 Reihenschaltung 31, 33, 131, 190, 274, 289, 307, 343  
 Reihenschaltung, gleichsinnige 344  
 Reihenschwingkreis 113, 133, 162  
 Remanenzflussdichte 306  
 Resistanz 128  
 Resonanzfall 140  
 Resonanzfrequenz 114, 165  
 Richtungspfeil 15  
 Richtungssinn 15  
 Ringspule 312, 319, 333, 338  
 RLC-Kombination, gemischte 115  
 RL-Kombination 348  
 Rücktransformation 127  
 Ruheinduktion 331  
**Sättigungsstrom** 86  
 Schaltvorgang 281, 348  
 Scheinleistung 188  
 Scheinleitwert 106  
 Scheinwiderstand 106  
 Scheinwiderstandsübersetzung 356  
 SCHERING- Brücke 146  
 Schleusenspannung 86  
 Schrittspannung 242, 247  
 Schrittspannung, maximale 244  
 Schwingkreis 162  
 Sekundärspule 340  
 Selbstinduktion 333  
 Selbstinduktionsspannung 333, 338, 341  
 Selbstinduktivität 357  
 SKIN-Effekt 107, 373  
 Spannung, elektrische 16f  
 Spannung, induzierte 329, 332, 348  
 Spannungsabfall 17  
 Spannungsmessbereichserweiterung 52

- Spannungsquellen-Ersatzschaltbild 41, 71, 151  
Spannungsteiler, belasteter 49  
Spannungsteilerregel 33f, 89, 132  
Spannungsteilerregel, kapazitive 276  
Spannungsüberhöhung 167  
Spannungswelle 184  
Spannungszählpfeil 26  
Spannungszeigerbild 118  
Spektralbereich 157  
Sperrbereich 164  
Sperrstrom 86  
Spiegelerder 246  
Spiegelladung 265, 266  
Spiegelungsprinzip 246  
Spule 300, 333, 343, 352  
Spule, reale 110  
Spule, vormagnetisierte 352  
Stabilisierungsfaktor 93  
Stellwiderstand 49  
Stern-Dreieck-Transformation 63  
Sternschaltung 59, 200  
Stetigkeit 260  
Stoff, diamagnetischer 300  
Stoff, ferromagnetischer 300  
Stoff, paramagnetischer 300  
Strangstrom 202  
Streufluss 335  
Streuinduktivität 361  
Strom, zeitlich veränderlicher 14  
Stromdichte 222  
Stromdichte, elektrische 228  
Stromdichtelinie 223  
Stromkreis, elektrischer 23  
Stromkreis, unverzweigter 17, 31  
Stromkreis, verzweigter 31  
Strommessbereichserweiterung 53  
Stromquellen-Ersatzschaltbild 41, 73, 151  
Stromröhre 222, 228, 350  
Stromröhre, differenzielle 228  
Strom-Spannungs-Kennlinie 23, 40, 54, 84  
Stromstärke 13  
Stromstärke, elektrische 13  
Stromteilerregel 35, 68, 132, 150  
Strömungsfeld 221  
Strömungsfeld, homogenes elektrisches 234  
Strömungsfeld, inhomogenes 229, 235  
Strömungsfeld, kugelsymmetrisches 236  
Strömungsfeld, zylindersymmetrisches 238  
Strömungslinie 223  
Stromzählpfeil 27  
Stromzeiger, konjugiert komplexer 190  
Superposition 68, 76, 149  
Suszeptanz 131  
Taktfrequenz 287  
Tangentialkomponente 260  
Tastverhältnis 354  
Teilstrom 37  
Temperaturabhängigkeit 21  
Temperaturkoeffizient 21, 87  
Temperaturspannung 86  
T-Ersatzschaltung 176, 346, 358  
Thermistor 87  
THOMSONSche Brückenschaltung 58  
THOMSONSche Schwingungsgleichung 114, 162  
Tiefpass 157  
Transformation 127  
Transformationsregel 62, 126  
Transformator 355  
Transformator, idealer 355  
Transformator, realer 359  
Transformator, verlustloser 341, 346  
Transformator, verlustloser und streuungsfreier 357  
Transformator-Ersatzschaltung 345  
Transformatorgleichungen 340  
Transformator-Verluste 360  
Trennfläche 257, 269  
Trennfläche, schräge 260  
Trennstelle 70, 151, 295  
Trenntransformator 355  
Übergangswiderstand 242, 247  
Überlagerung 101, 121, 210, 234, 246, 264, 313, 340  
Übersetzungsverhältnis 355  
Übertrager 340, 355, 360  
Übertragungsmaß, komplexes 182  
Übertragungsmaß, längenbezogenes 181  
Übertragungsvierpol 174  
Umlauf 26  
Umlaufanalyse 76, 153  
Umlaufintegral 232, 302, 356  
Umlaufsinn 66  
Umlaufspannung 331, 369  
Ummagnetisierungsverluste 360  
Umschalten 285, 352  
Unabhängigkeitsbedingung 28, 77  
Ursache-Wirkungs-Modell 24, 220, 226, 253, 302, 304  
Varistor 86  
Vektor-Basissystem 215



- Vektorfeld 216  
 Verbindungszweig 77  
 Verbraucher, symmetrischer 198  
 Verbraucherleistung 30  
 Verbraucherstrom 200  
 Verbraucher-Zählpfeilsystem 19, 30, 174, 267, 318, 333, 340, 349  
 Verkettungsfaktor 197  
 Verkopplung 335  
 Verkopplungen, wechselseitige 371  
 Verlustfaktor 146  
 Verlustwiderstand 111, 163  
 Verlustwiderstandskoeffizient 377  
 Verlustwinkel 111, 112  
 Verschiebungsfluss 253, 273, 354, 367  
 Verschiebungsflussröhre 253  
 Verschiebungspolarisation 272  
 Verschiebungsstrom 354, 355, 366  
 Verschiebungsstrom, dielektrischer 356  
 Verschiebungsstromdichte 355, 367  
 Vierleiternetz 209  
 Vierpol 156, 174, 340, 345, 355  
 Vierpolparameter 174  
 Vollausschlagspannung 52  
 Vollausschlagstrom 52  
 Vollkugelerder 245  
 Vorwärtsbetrieb 176  
 Vorwiderstand 52  
  
**W**  
 Wanderungsgeschwindigkeit 184  
 Wanderwelle 183  
 Wandler 340  
 Wechselgröße 94, 156  
 Wechselspannung, sinusförmige 329  
 Wechselstrom-Brückenschaltung 143  
 Wechselstromkreis, gemischter 131  
 Wechselstromschaltung, spezielle 141  
 WEIßsche Bezirke 305  
 Wellengleichung 184  
 Wellenlänge 179  
 Wellenmodell 183  
 Wellenwiderstand 182, 185  
 WHEATSTONEsche Brückenschaltung 57  
 Wicklung 298, 357  
 Wicklungskapazität 377  
 Wicklungsrichtung 336  
 Wicklungssinn 337, 340, 344  
 Wicklungssinn, gegensinniger 337  
 Wicklungssinn, gleichsinniger 337  
 Wicklungsverluste 110, 360  
 Widerstand 20f  
 Widerstand, differentieller 23, 85  
 Widerstand, elektrischer 20  
 Widerstand, komplexer 128, 138, 144  
 Widerstand, magnetischer 300  
 Widerstand, ohmscher 106, 129  
 Widerstand, spezifischer elektrischer 20  
 Widerstandsbelag 179  
 Widerstands-Temperatur-Kennlinie 87  
 Windung 298, 317  
 Windungszahl 301, 305, 332, 357  
 Wirbelfeld 217, 221, 298, 313  
 Wirbelfeld, quellenfreies 359  
 Wirbelstrom 357, 371f  
 Wirbelstromverluste 360, 371  
 Wirkleistung 187, 205, 355  
 Wirkleistungsmesser 206  
 Wirkspannung 190  
 Wirkstrom 191  
 Wirkungsgrad 44  
 Wirkwiderstand 106  
  
**Z**  
 Zählpfeil 15, 26, 32, 66, 116, 150, 290, 301, 328  
 Zählpfeilsystem, symmetrisches 355  
 Z-Diode 91  
 Zeiger 96  
 Zeiger, konjugiert komplexer 125, 135  
 Zeiger, rotierender 125  
 Zeiger, ruhender 125  
 Zeigerbild 107, 115, 120, 188, 197  
 Zeigerbild, qualitatives 116  
 Zeigerbild, quantitatives 116  
 Zeigerdarstellung 122  
 Zeigerdiagramm 96, 120  
 Zeitbereich 120  
 Zeitfunktion 284  
 Zeitfunktion, nichtsinusförmige 94  
 Zeitfunktion, periodische 94  
 Zeitfunktion, sinusförmige 95  
 Zeitkonstante 282, 349  
 Zweig 26, 32  
 Zweigspannung 82  
 Zweigstrom 26, 32, 68  
 Zweipol 31  
 Zweipol, aktiver 310  
 Zweipol, elementarer 106, 110  
 Zweipol, passiver 33, 38, 79, 310  
 Zweipoltheorie 70, 151, 174  
 Zweitor 174  
 Zylinderkondensator 264  
 Zylinderspule 299  
  
**II-Ersatzschaltung** 177, 180, 347