

Helmut Haase · Heyno Garbe · Hendrik Gerth
Grundlagen der Elektrotechnik

3. erweiterte Auflage

Mit 368 Abbildungen und 82 Beispielen

SchöneworthVerlag

Professor Dr.-Ing. Helmut Haase
Professor Dr.-Ing. Heyno Garbe
Dr.-Ing. Hendrik Gerth
Leibniz Universität Hannover
Institut für Grundlagen der Elektrotechnik und Messtechnik
Appelstraße 9A
30167 Hannover
www.geml.uni-hannover.de

Bibliographische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet unter <http://www.d-nb.de/> abrufbar.

Erscheinungsjahr der 3. Auflage: 2009

461 Seiten, 368 Abbildungen, 82 Beispiele

SchöneworthVerlag
Königsworther Str. 6
30167 Hannover

Das Werk einschließlich aller Abbildungen ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung der Autoren unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einsspeicherung und Bearbeitung in elektronischen Systemen.

© Helmut Haase 2009

Einbandentwurf: Helmut Haase
Satzherstellung mit \LaTeX
Gedruckt auf säure- und chlorfreiem Papier
Druck: Interdruck Berger GmbH, Hannover

ISBN: 3-9808805-5-9

Vorwort

Diese *Grundlagen der Elektrotechnik* fassen die gleichnamige Vorlesung zusammen, welche die beiden erstgenannten Autoren seit Beginn der 90er Jahre an der Universität Hannover halten. Der etwa hundert Vorlesungsstunden umfassende Stoff erschließt eine Auswahl der Begriffe und Methoden, die den elektrotechnischen Fachgebieten gemeinsam sind.

Den Kern des Buches bilden die Kap. 6 bis 9 über das elektrostatische, das Strömungs- und das Magnetfeld. Die Felder fundieren das Verständnis der Elektrizität. Alle anderen Kapitel behandeln Netzwerke. In den einführenden Kap. 1–5 sind dies Gleichstrom-, in Kap. 10–15 Wechselstrom- und Drehstromnetzwerke sowie Netze mit beliebigem Zeitverlauf der Erregung. Instationäre und Einschaltvorgänge sind eingeschlossen, ebenso nichtlineare Vorgänge und deren numerische Berechnung. Zur Methode des Zustandsraumes hinführend werden die instationären Vorgänge mit Differentialgleichungen erster Ordnung behandelt.

Für die vorangestellten Gleichstromnetzwerke werden nur geringe mathematische Fertigkeiten vorausgesetzt: Grundkenntnisse der Algebra und elementarer Funktionen sowie die Vertrautheit mit dem Ableitungs- und Integralbegriff genügen. Spätere Kapitel nutzen weitere mathematische Hilfsmittel, die in Kap. 6 vorgestellt werden. Dabei bleibt die routinierte Rechenfertigkeit zweitrangig. Wichtiger ist es, die *Bedeutung* der mathematischen Begriffe und Operationen zu erkennen. Man sollte z. B. die in der Feldtheorie üblichen Linien-, Flächen- und Volumenintegrale – unerachtet spezieller Koordinatensysteme und Integrationsmethoden – einfach als Summen verstehen.

Der Text eignet sich bei Einhaltung seiner Reihenfolge zum Selbststudium, berücksichtigt aber auch den Wunsch nach selektiver Lesbarkeit. Zahlreiche Rückverweise verknüpfen das Neue mit bereits Dargestelltem und helfen, Wissenslücken zu schließen.

Der Sprachstil stellt Präzision über Redundanz. Trotz der erreichten Kürze bleibt Raum für Analogien: Das Gemeinsame verschiedener Fachgebiete zu

erkennen – z. B. der Elektrotechnik, Mechanik, Hydraulik oder Wärmelehre – reduziert die Fülle des Stoffs und vertieft sein Verständnis.

Beispiele sind in dem Umfang eingearbeitet, wie zur Erläuterung des Grundsätzlichen hilfreich. Die angegebenen Zahlenwerte erlauben, die Ergebnisse nachzurechnen. Auch Verfahren der numerischen Mathematik sind mit allen Parametern nachvollziehbar eingebunden.

Besonderer Dank gebührt den Mitarbeitern des Instituts für Grundlagen der Elektrotechnik und Messtechnik der Universität Hannover für Anregungen und Korrekturen. Das Ziel war null Fehler. Wenn Sie, liebe Leserin oder lieber Leser, trotzdem einen Fehler entdecken oder Verbesserungen vorschlagen möchten, schreiben Sie an den erstgenannten Autor. Seine Mail-Adresse finden Sie unter der auf S. IV angegebenen URL.

Das in der *Literaturauswahl* im Anhang A unter [HaGa] auf S. 374 aufgeführte Übungsbuch enthält ausführlich gelöste Aufgaben, deren Bearbeitung zur Aneignung des Stoffs ausdrücklich empfohlen wird. Das Übungsbuch ist eng auf den vorliegenden Band abgestimmt. In letzterem stehen am Ende vieler Abschnitte Hinweise, welche Aufgaben des Übungsbuchs bis dahin bearbeitet werden können (siehe z. B. auf Seite 2 oben).

Die Autoren hoffen, dass ihre *Grundlagen der Elektrotechnik* nicht nur im Grundstudium und zur Prüfungsvorbereitung nützen; auch später können darin elektrotechnische Begriffe, Regeln und Gesetze schnell nachgeschlagen werden. Anders als rasch veraltendes Technologiewissen haben die *Grundlagen der Elektrotechnik* kein Verfallsdatum.

Hannover, Oktober 2009

Helmut Haase, Heyno Garbe, Hendrik Gerth

Zur 2. Auflage

Der Band ersetzt den 1997 bei Springer erschienenen gleichnamigen Titel. Demgegenüber sind alle bekannten Druckfehler berichtigt und einige Formulierungen klargestellt oder ergänzt worden. Die Abschnitte *Permanentmagnetkreis* und *Gesteuerte Quellen* sind neu hinzugekommen. Andere wurden überarbeitet. Hendrik Gerth konnte als Mitautor gewonnen werden.

Hannover, Dezember 2004 Helmut Haase, Heyno Garbe, Hendrik Gerth

Zur 3. Auflage

Gegenüber der zweiten Auflage wurden weitere Druckfehler berichtigt, das Layout überarbeitet, insbesondere bei den Beispielen, und einige Formulierungen klargestellt oder ergänzt. Die Literaturliste und die Tabellen wurden in den neu geschaffenen Anhang verlegt, der jetzt mehr als ein Fünftel des Buchs umfasst.

Neu sind die Abschnitte *Feldlinien* und *Methode der virtuellen Verschiebung zur Kraftberechnung* im Magnetfeld und *Elektromagnetische Wellen*, sowie – im Anhang – die *Präsenzwissens-Formeln*, die Tabellen *Schaltzeichen* und *Koordinatensysteme* und *Einheitsvektoren in kartesischer Darstellung* und *Koordinatentransformation von Vektorfeldern* und der ausführliche *Bildanhang* mit Feldbildern und Fotos elektrotechnischer Produkte, ebenso die Tabellen zur *Einteilung der Elektrotechnik und Informationstechnik*.

Hannover, Oktober 2009 Helmut Haase, Heyno Garbe, Hendrik Gerth

Gebrauchsanleitung

Hier sind besondere Symbole und Begriffe sowie typographische Vereinbarungen erklärt.

1. $I = 3 \text{ A}$, $\{I\}_{\text{SI}} = 3$, $[I]_{\text{SI}} = \text{A}$

Größensymbole – wie z. B. I für die Stromstärke – sind *kursiv* gesetzt, Zahlen einschließlich der imaginären Einheit j und Einheiten dagegen steil. Ebenfalls steil erscheinen Naturkonstanten wie ϵ_0 und μ_0 oder spezielle Zahlen wie e und π , da sie festgelegt sind. Kursiven Symbolen kann stets ein gewünschter Größenwert, bestehend aus Zahlenwert und Einheit, zugewiesen werden. Steil gestellte sind dagegen vordefiniert.

Geschweifte oder eckige Klammern spalten den Zahlenwert bzw. die Einheit der eingeklammerten Größe ab. Die Operation ist eindeutig, wenn die Klammern mit einem Kürzel für das verwendete Einheitensystem indiziert sind. Hier sind ausschließlich SI-Einheiten verwendet (vgl. **Tab.** B.2 bis B.4).

2. $I = \frac{dQ_D}{dt}$, $\int y dx$, $\sin \alpha$, $Q = \int_{\text{Volumen}} \rho dV$

Das Differentialzeichen d bei Ableitungen und Integralen ist steil gesetzt. Standardfunktionen wie „sin“ oder „cos“ sind zur Abhebung von den kursiven Variablen ebenfalls steil gesetzt.

Bei Linien-, Flächen- oder Volumenintegralen ist der unter dem Integralzeichen angegebene Integrationsbereich – bei $Q = \dots$ das Volumen – steil gesetzt. Der Volumenbegriff bezeichnet hier ein dreidimensionales geometrisches Gebilde. Sein in m^3 zu messender Inhalt V ist nur eine spezielle Eigenschaft des Volumens. Auch Flächen oder Kurven sind in diesem Sinne umfassende geometrische Gebilde, die von ihrem Inhalt A bzw. ihrer Länge l zu unterscheiden sind.

3. Kursivdruck

markiert Beispiele, Merksätze oder Betonungen.

4. Kleindruck

wird für Bild- und Tabellentitel verwendet.

5. Formelunterstreichung

weist auf fundamentale Bedeutung der Formel hin, z. B. Gl. (7.6) auf S. 87.

6. Differentielle Größen dt , dQ_D , Grenzwert $\frac{\sin x}{x} \stackrel{x \rightarrow 0}{\equiv} 1$

Differentielle Größen werden häufig einfach als *kleine* Größen bezeichnet (z. B. die kleine Zeitspanne dt , oder der kleine Beitrag dQ_D zum Ladungsdurchsatz). Zu betonen, dass sie eigentlich unbegrenzt (infinitesimal) klein sind, wäre für den Umgang mit ihnen eher hinderlich.

Die *Grenzwertoperation* wird abgekürzt notiert. Das Beispiel in der Überschrift steht für $\lim_{x \rightarrow 0} \left(\frac{\sin x}{x} \right) = 1$.

7. Vektoren \vec{v} , \vec{B} und komplexe Größen \underline{U} , \underline{I}

sind am Pfeil über dem Buchstabensymbol bzw. an der Unterstreichung erkennbar. Mit Koordinaten ausgeschriebene Vektoren werden vorzugsweise in Spaltenform notiert; im laufenden Text kommt auch die gleichwertige Zeilenform vor.

8. Koordinate v_x und Komponente $\vec{v}_x = v_x \vec{e}_x$ des Vektors \vec{v}

sind voneinander zu unterscheiden. Koordinaten sind Skalare, Komponenten Vektoren. Im Schrifttum werden Koordinaten auch als Projektionen oder – normwidrig und verwirrend – als Komponenten bezeichnet.

9. Spaltenmatrix \bar{z} , Matrix $\overline{\overline{A}}$, Tensor \mathbf{S}

Spaltenmatrizen (n Zeilen, eine Spalte) – häufig, aber missverständlich als Vektoren bezeichnet – sind einmal überstrichen, Matrizen mit Zeilen und Spalten doppelt. Tensoren sind fett gedruckt. Die Notation erlaubt hand- und druckschriftlich identische Symbole, von den nur ganz am Rande vorkommenden Tensoren abgesehen.

10. Pfeile in Abbildungen

Linien mit einem Halbpfel (\rightarrow) an einem Ende stellen skalare Größen dar, z. B. Koordinaten eines Vektors oder den Wert eines Nullphasenwinkels. Zeigt der Halbpfel in Richtung der zugehörigen Achse, markiert er einen positiven Wert, andernfalls einen negativen. Solche Halb Pfeile sind keine Bezugspfeile.

Linien mit Pfeilen oder Halb Pfeilen an beiden Enden stellen Skalare dar, die nach ihrer Definition nicht negativ sein können, z. B. Längen oder Amplituden.

Vektoren oder Zeiger, die normalerweise vollständige Pfeilspitzen haben, sind gelegentlich ebenfalls als Halbpfleile gezeichnet; in Treffpunkten ihrer Spitzen sind die Vektoren bzw. Zeiger dadurch leichter zu unterscheiden.

11. Normen

Für Begriffe und Symbole sind weitgehend die DIN-Normen beachtet.

12. Kurvendiagramme

sind mit dem Mathematik-Programm MATLABTM berechnet und gezeichnet.

13. Größensymbole

sind im Text erklärt und in **Tab. B.4** im Anhang zusammengestellt.

14. Summenzeichen \sum und Σ

Wie die Summenoperation auszuführen ist, hängt davon ab, ob den zu summierenden Größen ein Bezugs Pfeil zugeordnet ist oder nicht. Im letzten, einfacheren Fall sind die Größen immer zu addieren.

Bei Bezugs Pfeilgrößen (z. B. Spannung, Strom, Leistung, magnetischer Fluss), muss immer eine der beiden möglichen Summierungsrichtungen festgelegt werden, bei Strömen z. B. vom Knoten fortweisend. Nur die Größen, deren Bezugs Pfeil mit der Summierungsrichtung übereinstimmen, sind zu addieren; die gegenläufigen sind zu subtrahieren. Wenn die Summe eine Masche oder einen Knoten betrifft, erinnert ein Ring an diese besondere Summenkonvention.

Beim Rechnen mit Zahlenwerten ist in beiden Fällen zusätzlich deren Vorzeichen zu berücksichtigen. Details siehe Kap. 1 bis 3!

15. Sachverzeichnis

Zusammengesetzte Begriffe sind nach dem ersten Substantiv des Suchbegriffs ins Alphabet eingeordnet. Das Ohm'sche Gesetz und die Maxwell'schen Gleichungen finden Sie also unter *Gesetz, Ohm'sches* bzw. *Gleichungen, Maxwell'sche*.

16. Gliederungsstufen

Kapitel (z. B. Kap. 1), Abschnitt (z. B. Abschn. 1.1), Unterabschnitt: Ohne Nummer, erkennbar an fett gedruckter Überschrift

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|------|
| Vorwort | V |
| Gebrauchsanleitung | IX |
| Inhaltsverzeichnis | XVII |
| 1 Grundbegriffe | 1 |
| 1.1 Ladung als elektrisches Grundphänomen | 1 |
| 1.2 Elektrische Stromstärke als Ladungsströmung | 2 |
| 1.3 Ladungserhaltungsgesetz | 4 |
| 1.4 Äquivalenz von Ionen- und Massestrom | 6 |
| 1.5 Elektrische Spannung als energieverwandte Größe | 8 |
| 1.6 Verbraucher- und Erzeugerpfilsystem | 9 |
| 2 Einfacher Stromkreis | 13 |
| 2.1 Ideale Stromquelle und ideale Spannungsquelle | 13 |
| 2.2 Widerstand und Leitwert, Ohm'sches Gesetz | 15 |
| 2.3 Widerstand eines stabförmigen Leiters | 17 |
| 2.4 Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstands | 17 |
| 2.5 Berechnung des einfachen Stromkreises | 18 |
| 3 Verzweigter Stromkreis | 21 |
| 3.1 Aufgabenstellung | 21 |
| 3.2 Knotensatz von Kirchhoff und Maschenströme | 22 |
| 3.3 Maschensatz von Kirchhoff und Knotenpotenziale | 25 |
| 3.4 Verbraucher in Reihen- oder Parallelschaltung | 28 |
| 3.5 Quellen mit Innenwiderstand, Wirkungsgrad | 30 |
| 3.6 Gesteuerte Quellen | 36 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 4 | Allgemein anwendbare Verfahren zur Netzwerkberechnung | 37 |
| 4.1 | Netzwerkberechnung mit Zweigströmen als Unbekannte | 37 |
| 4.2 | Netzwerkberechnung mit Maschenströmen als Unbekannte | 39 |
| 4.3 | Netzwerkberechnung mit Knotenpotenzialen als Unbekannte | 40 |
| 5 | Spezielle Verfahren zur Netzwerkberechnung | 43 |
| 5.1 | Netzwerkberechnung nach dem Überlagerungsprinzip | 43 |
| 5.2 | Netzwerkreduktion auf Ersatzquellen | 47 |
| 5.3 | Netzwerkberechnung durch Zweipolzerlegung | 51 |
| 5.4 | Stern-Polygon-Umwandlung | 52 |
| 5.5 | Unendlich langes Kettennetzwerk | 56 |
| 6 | Mathematische Begriffe der Feldtheorie | 59 |
| 6.1 | Linienintegral eines Vektorfeldes | 60 |
| 6.2 | Umlaufintegral oder Zirkulation eines Vektorfeldes | 61 |
| 6.3 | Fluss eines Vektorfeldes durch eine Fläche, Flussdichte | 62 |
| 6.4 | Fluss eines Skalarfeldes durch eine Fläche | 63 |
| 6.5 | Hüllenfluss eines Vektorfeldes | 64 |
| 6.6 | Hüllenfluss eines Skalarfeldes | 65 |
| 6.7 | Gradient eines Skalarfeldes | 65 |
| 6.8 | Rotation eines Vektorfeldes | 67 |
| 6.9 | Potenzial eines Vektorfeldes | 69 |
| 6.10 | Divergenz eines Vektorfeldes | 70 |
| 6.11 | Integralsatz von Gauß | 71 |
| 6.12 | Integralsatz von Stokes und zwei weitere Integralsätze | 71 |
| 6.13 | Linien, Flächen und Volumen als Bilanzinstrumente | 73 |
| 6.14 | Ableitungen in kartesischen Koordinaten | 74 |
| 6.15 | Tensoren | 74 |
| 6.16 | Feldbilder in Beispielen | 76 |
| 6.17 | Feldlinien | 81 |
| 7 | Elektrostatik | 85 |
| 7.1 | Verteilungsarten der elektrischen Ladung | 85 |
| 7.2 | Ladungserhaltungsgesetz | 86 |
| 7.3 | Coulombkraft als Fernwirkung | 87 |
| 7.4 | Coulombkraft als Nahwirkung des elektrischen Feldes | 89 |
| 7.5 | Coulombkraft und elektrisches Feld in Materie | 90 |
| 7.6 | Berechnung des elektrischen Feldes im homogenen Raum | 91 |
| 7.7 | Kraft und Drehmoment auf einen elektrischen Dipol | 93 |
| 7.8 | Elektrischer Fluss und Gauß'scher Satz der Elektrostatik | 94 |

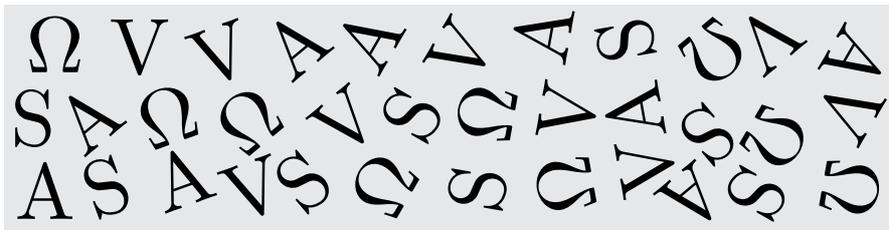
| | | |
|----------|--|------------|
| 7.9 | Elektrische Spannung und elektrisches Potenzial | 96 |
| 7.10 | Elektrisches Potenzial aus der Ladungsverteilung | 103 |
| 7.11 | Elektrische Feldstärke aus dem elektrischen Potenzial | 104 |
| 7.12 | Das elektrostatische Feld an Grenzflächen | 105 |
| 7.13 | Kapazität einer Zweielektrodenanordnung | 109 |
| 7.14 | Mehrelektrodenanordnungen | 113 |
| 7.15 | Energie des elektrostatischen Feldes | 115 |
| 7.16 | Methode der virtuellen Verschiebung zur Kraftberechnung | 118 |
| 7.17 | Kräfte aus den fiktiven mechanischen Feldspannungen | 121 |
| 7.18 | Kraft auf Elektroden | 125 |
| 7.19 | Kraft auf ladungsfreie Isolierstoffgrenzflächen | 128 |
| 7.20 | Kraftdichte im elektrostatischen Feld | 129 |
| 7.21 | Feldberechnung mit dem Gauß'schen Satz | 130 |
| 7.22 | Feldermittlung durch Vergleich mit bekannten Feldbildern | 131 |
| 7.23 | Feldbildskizze für ebene Felder | 131 |
| 7.24 | Abschirmung elektrostatischer Felder | 134 |
| 7.25 | Elektrische Polarisierung | 136 |
| 7.26 | Zusammenfassung der Elektrostatik | 142 |
| 8 | Stationäres elektrisches Strömungsfeld | 143 |
| 8.1 | Elektrische Stromdichte und elektrische Stromstärke | 144 |
| 8.2 | Kirchhoff'scher Knotensatz im Strömungsfeld | 146 |
| 8.3 | Ohm'sches Gesetz und Coulombkraft im Strömungsfeld | 147 |
| 8.4 | Eingeprägte Feldstärke und Kirchhoff'scher Maschensatz | 149 |
| 8.5 | Grenzflächen | 151 |
| 8.6 | Elektrischer Leitwert und Kapazität | 153 |
| 8.7 | Leistung und Arbeit | 157 |
| 8.8 | Analogie von Strom- und Pumpenkreis | 159 |
| 8.9 | Zusammenfassung zum stationären Strömungsfeld | 165 |
| 9 | Magnetisches Feld | 167 |
| 9.1 | Magnetisches Dipolmoment und magnetische Flussdichte | 168 |
| 9.2 | Magnetfeld einer bewegten Punktladung im leeren Raum | 171 |
| 9.3 | Magnetfeld von Leiterschleifen und Strömungsgebieten | 172 |
| 9.4 | Magnetfeld als quellenfreies Wirbelfeld | 176 |
| 9.5 | Magnetisches Vektor- und Skalarpotenzial | 185 |
| 9.6 | Kraft auf eine bewegte Ladung im Magnetfeld | 190 |
| 9.7 | Kraft und Drehmoment auf stromführende Leiter | 192 |
| 9.8 | Magnetfeld in Stoffen | 195 |

| | | |
|-----------|---|------------|
| 9.9 | Magnetfeld an Grenzflächen | 201 |
| 9.10 | Magnetfeld der Ringspule und der langen Zylinderspule | 202 |
| 9.11 | Magnetischer Eisenkreis | 204 |
| 9.12 | Permanentmagnetkreis | 207 |
| 9.13 | Kräfte aus den fiktiven mechanischen Feldspannungen | 208 |
| 9.14 | Magnetische Flächenkraftdichte | 210 |
| 9.15 | Kraftdichte im Magnetfeld | 213 |
| 9.16 | Induktionsgesetz | 214 |
| 9.17 | Spannungsinduktion in bewegten Leiterkreisen | 217 |
| 9.18 | Magnetischer Schwund | 220 |
| 9.19 | Selbst- und Gegeninduktivität | 225 |
| 9.20 | Energie des Magnetfeldes | 233 |
| 9.21 | Elektromagnetische Wellen | 237 |
| 9.22 | Zusammenfassung zum Magnetfeld | 247 |
| 10 | Lineare Netzwerke mit harmonischer Erregung | 249 |
| 10.1 | Grundbegriffe | 250 |
| 10.2 | Reelle und komplexe Darstellung harmonischer Zeitverläufe | 253 |
| 10.3 | Zeigerrechnung für Wechselstromnetze | 261 |
| 10.4 | Reihenschwingkreis | 268 |
| 10.5 | Leistung bei harmonischem Verlauf von Strom und Spannung | 274 |
| 11 | Ortskurven | 281 |
| 11.1 | Effektivwert einer Quellenspannung als Parameter | 282 |
| 11.2 | Nullphasenwinkel einer Quellengröße als Parameter | 283 |
| 11.3 | Wert eines Schaltelements als Parameter | 283 |
| 11.4 | Kreisfrequenz als Parameter | 285 |
| 12 | Drehstrom | 291 |
| 12.1 | Symmetrische Drehstromsysteme | 293 |
| 12.2 | Unsymmetrische Drehstromsysteme | 299 |
| 12.3 | Leistung im Drehstromsystem | 307 |
| 13 | Lineare Netzwerke mit periodischer Erregung | 313 |
| 13.1 | Periodische Funktion als harmonische Summe | 313 |
| 13.2 | Netzwerkberechnung mit periodischen Quellengrößen | 316 |
| 13.3 | Leistung periodischer Ströme und Spannungen | 316 |
| 13.4 | Kirchhoff'sche Sätze und Energieerhaltung | 320 |

| | |
|---|-----|
| 14 Nichtlineare Widerstandsnetzwerke | 323 |
| 14.1 Kennlinien | 324 |
| 14.2 Maschen- und Knotengleichungen | 326 |
| 14.3 Unverzweigter nichtlinearer Stromkreis | 326 |
| 14.4 Verzweigter nichtlinearer Stromkreis | 328 |
| 15 Instationäre Vorgänge in Netzwerken | 333 |
| 15.1 Wahl zweckmäßiger Variablen | 334 |
| 15.2 Zwei Beispiele mit numerischer Lösung | 335 |
| 15.3 Lineare Netzwerke mit einem Speicher | 340 |
| 15.4 Lineare Netzwerke mit zwei oder mehr Speichern | 350 |
| 15.5 Große Netzwerke | 358 |
| 15.6 Schaltvorgänge | 361 |
| 15.7 Nichtlineare Speicher | 362 |
| 15.8 Hinweis zur Stabilität | 366 |
| Anhang | 371 |
| A Literatúrauswahl | 373 |
| B Tabellen, Programme | 377 |
| C Präsenzwissens-Formeln | 395 |
| D Bildanhang | 405 |
| D.1 Elektrostatistisches Feld | 406 |
| D.2 Elektrisches Strömungsfeld | 412 |
| D.3 Magnetostatisches Feld | 415 |
| D.4 Schnellveränderliches elektromagnetisches Feld | 425 |
| D.5 Fotos elektrotechnischer Produkte | 427 |
| E Einteilung der Elektrotechnik und Informationstechnik | 441 |
| Namensverzeichnis | 447 |
| Sachverzeichnis | 449 |

Grundbegriffe

In diesem Kapitel werden die physikalischen Größen Ladung, Strom und Spannung und ihre Verknüpfungen erläutert. Als erstes Naturgesetz kommt das Ladungserhaltungsgesetz zur Sprache. Die Behandlung des Erzeuger- und Verbraucherpfilsystem, welche die Bedeutung der Größenwertvorzeichen bestimmen, schließt das Kapitel ab.



1.1 Ladung als elektrisches Grundphänomen

Die elektrische Ladung spielt in der Elektrizitätslehre eine ähnliche Rolle wie in der Mechanik die Masse. Die elektrische Ladung Q tritt in der Materie fein verteilt auf, im Gegensatz zur Masse aber in zwei Polaritäten. Ein Proton trägt die in der Einheit Coulomb¹ gemessene positive Ladung

$$Q_{\text{Proton}} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{C} \quad [Q]_{\text{SI}} = \text{C} = \text{Coulomb}, \quad (1.1)$$

ein Elektron die betragsmäßig gleich große negative Ladung

$$Q_{\text{Elektron}} = -1,602 \cdot 10^{-19} \text{C}. \quad (1.2)$$

Den Ladungsbetrag dieser Atombausteine bezeichnet man als Elementarladung e . Kleinere Ladungsportionen existieren nicht. Damit gilt

¹ Ch. A. de Coulomb 1736 - 1806

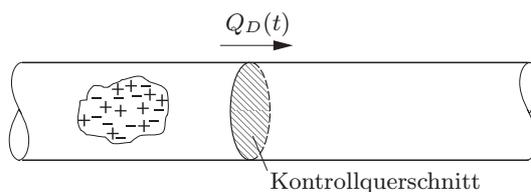


Bild 1.1 Leiter mit (Kontroll-)Querschnitt und Bezugspfeil für den Ladungsdurchsatz $Q_D(t)$

$$e = Q_{\text{Proton}} = -Q_{\text{Elektron}} \quad (1.3)$$

Die Größe e ist eine Naturkonstante (vgl. **Tab. B.7** im Anhang). Solange sich positive und negative Ladungen lokal kompensieren und ungeordnet bewegen, treten weder elektrische noch magnetische Erscheinungen auf.

Übungsaufgaben: [HaGa, Aufg. 1.1, 1.2 (allgemeine Vorübung)]

1.2 Elektrische Stromstärke als Ladungsströmung

Ein Stoff oder ein Gebiet verhält sich elektrisch neutral, wenn sich seine positive Ladung Q_+ und seine negative Ladung Q_- überall neutralisieren. In diesem Fall ist die *wahre*² Ladung

$$Q = Q_+ + Q_- \quad (1.4)$$

des Gebietes gleich null.

Um einen elektrischen Strom zu erzeugen, ist wahre Ladung nicht erforderlich. Es genügt, wenn sich z. B. Elektronen gegenüber ruhenden Atomkernen gerichtet bewegen. Der stromführende Stoff bleibt dabei ladungsneutral.

Die Ladungsströmung in einem Leiter (**Bild 1.1**) wird durch den im Folgenden erklärten Ladungsdurchsatz $Q_D(t)$ beschrieben. Q_D ist eine Funktion der Zeit t .

Zur Ermittlung von $Q_D(t)$ legt man längs des Leiters eine Bezugsorientierung (Bezugspfeil) für $Q_D(t)$ fest und registriert (zählt und bewertet) die den markierten Querschnitt durchsetzenden Ladungsträger (**Bild 1.1**).

Der während der kurzen Zeitspanne dt registrierte differentielle Ladungsdurchsatz dQ_D ist vereinbarungsgemäß positiv, wenn positive Ladungsträger den Querschnitt in Pfeilrichtung durchsetzen (oder negative Ladungen entgegen der Pfeilrichtung). In diesem Fall steigt $Q_D(t)$. Wenn negative Ladungsträger den markierten Querschnitt in Pfeilrichtung durchsetzen oder positive Ladung ihr entgegen, ergibt sich dQ_D negativ, d. h. $Q_D(t)$ fällt.

$Q_D(t)$ kann als Anzeige eines Ladungsmessers verstanden werden, der den beschriebenen Vorzeichenregeln gehorcht. Die Einbaurichtung (Polung) des

² Der Zusatz *wahr* grenzt gegen später eingeführte weitere Ladungsbegriffe ab.

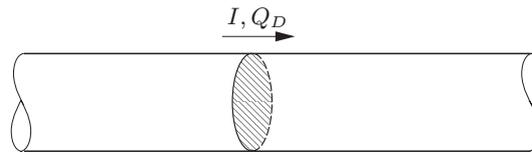


Bild 1.2 Ladungsdurchsatz und Stromstärke im Leiter haben denselben Bezugspfeil

Ladungsmessers ist in gleicher Weise wählbar wie die Orientierung des oben erwähnten Bezugspfeils. Wenn die Anzeige des Ladungsmessers mit der Zeit fällt oder negativ ist, heißt das nicht, dass er „falsch gepolt“ ist. Dementsprechend ist der Bezugspfeil nicht „falsch gewählt“, wenn sich im konkreten Fall negative Zahlenwerte ergeben.

Durch Auswertung von $Q_D(t)$ kann die elektrische Stromstärke $I(t)$ im Leiter als (Differential-)Quotient

$$I = \frac{dQ_D}{dt} \quad [I]_{\text{SI}} = \frac{\text{C}}{\text{s}} = \text{A} = \text{Ampere}^3 \quad (1.5)$$

bestimmt werden. Die Einheit Ampere gehört zu den Basiseinheiten des SI.

Die elektrische Stromstärke⁴ ist der Differentialquotient von Ladungsdurchsatz und Zeit.

Der differentielle Ladungsdurchsatz dQ_D in Gl. (1.5) benötigt zur Klärung der Bedeutung seines Vorzeichens einen Bezugspfeil (**Bild 1.1**). Derselbe Bezugspfeil gehört auch zur vollständigen Angabe der elektrischen Stromstärke I (**Bild 1.2**).

Gl. (1.5) erklärt die elektrische Stromstärke aus dem Ladungsdurchsatz. Bei gegebener Zeitfunktion der Stromstärke $I(t)$ kann der Ladungsdurchsatz

$$Q_D(t) = \int_0^t I(\tau) d\tau + Q_{D0} \quad (1.6)$$

durch Integration aus Gl. (1.5) errechnet werden. Darin bedeuten

| | |
|-------------------|--|
| t | Zeitpunkt, für den Q_D ermittelt wird, |
| τ | Zeit als Integrationsvariable, |
| $Q_{D0} = Q_D(0)$ | Wert von Q_D zur Zeit $t = 0$. |

Wird die elektrische Stromstärke in Analogie zum Volumenstrom (in m^3/s) gesetzt, so entspricht dem Ladungsdurchsatz Q_D ein Volumen (z. B. Anzeige einer Wasseruhr in m^3).

Aus Gl. (1.5) oder Gl. (1.6) folgt, dass $I(t)$ und $Q_D(t)$ alternative Begriffe sind, die beide das Phänomen der elektrischen Strömung durch einen Leiterquerschnitt beschreiben (**Bild 1.3**).

³ A. M. Ampère 1775-1836

⁴ Die elektrische Stromstärke heißt oft auch *elektrischer Strom* oder noch kürzer *Strom*.

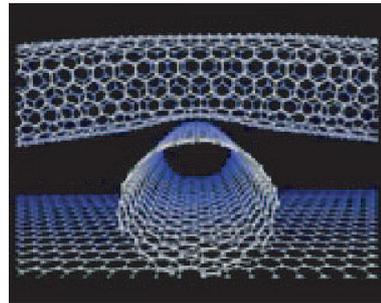
D.5 Fotos elektrotechnischer Produkte

Die Auswahl der Produktfotos in Tab. D.1 bis D.11 ist an die Einteilung von Tab. E.2 angelehnt. Die Bilder zeigen naturgemäß eine willkürliche Auswahl. Vollständigkeit ist auf Grund der beinahe unbegrenzten Vielfalt weder angestrebt noch erreichbar.

Tabelle D.1



Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung, Umrichterstation, 500 MW, 400 kV
Siemens



Nanoröhren – 10000 mal dünner als ein Menschenhaar. Die Nanotechnik verspricht maßgeschneiderte Moleküle
IBM



Nichtkornorientiertes Elektroblech zur Herstellung von verlustarmen Generatoren, Motoren und Transformatoren
ThyssenKrupp Steel



Elektrische Isolationen sind rauen Umgebungsbedingungen ausgesetzt
BASF

Tabelle D.2



Kommunale Abwasserbehandlungsanlagen benötigen elektrische Pumpenantriebe und Leittechnik
Siemens Water Technologies



Elektrostatischer Filter zur Abgasreinigung des Heizkraftwerks Stuttgart-Münster
EnBW



Blitzschutzmaßnahmen bei Windkraftanlagen
Fiberline Composites



In gefährdeter Umgebung müssen elektrische Betriebsmittel explosionsgeschützt sein. Zünddreieck
PTB Braunschweig

Tabelle D.3



Getriebeloser Windkraftgenerator. Tausend dieser Generatoren erreichen bei starkem Wind fast die Leistung der nebenstehenden Turbogruppe.
Siemens



Turbogeneratoren (vorne links) sind die bedeutendsten Stromquellen der öffentlichen Energieversorgung.
Alstom Power



Drehstromdrossel zur Blindleistungsaufnahme 150 MVA, 400 kV
ABB AG Transformers



Vollgesteuerte Drehstrom-Gleichrichterbrücke 1600 V
Infineon

Sachverzeichnis

- $x \stackrel{=}{=} 0$ Symbol für Grenzwertbildung X
- ∂ Randsymbol 73
- Σ : Summensymbole XI
- { } Zahlenwert einer Größe IX
- [] Einheit einer Größe IX
- [] Verweis auf Übungsbuch VI

- Abklingkoeffizient 356
- Ableitung
 - partielle 77, 330
- Abschalten
 - induktiver Stromkreis 349
- Abschirmung elektrostatischer Felder 134
- Abstandsvektor 92
- Addition harmonischer Größen 256
- Admittanz 267, 268
 - komplexe 268
- ÄPF *siehe* Äquipotenzialfläche
- Äquipotenzialfläche
 - elektrische 101, 106, 108, 125
- Äquipotenzialfläche 408
- Äquipotenzialkörper
 - elektrischer 108
- Äquipotenziallinie
 - elektrische 105, 133
- Akkumulator 30, 32, 35
- Alphabet
 - griechisches 380
- Amplitude 250
- Analogie 159

- Definition 159
- hydraulische 161
- von magnetischem und elektrischem Kreis 205
- von Strom- und Pumpenkreis 159
- Anfachkoeffizient 356
- Anfangsvektor 351
- Anfangswert 335, 340
- Anfangswertproblem 340, 351
 - nichtlineares 363
- Anfangszustand
 - Netzwerk 313
- Anisotropie
 - Widerstand 149
- Anpassung
 - Verbraucher an Quelle 32, 35
- Anregung
 - eigenwertnahe 273
- antiferromagnetisch 197
- Arbeit
 - elektrische
 - im Strömungsfeld 157
 - virtuelle
 - Prinzip 120
- Arbeitspunkt
 - Kennlinie 15
 - Stabilität 366
- Archimedes *siehe* Prinzip von A.
- Arcus-Funktion 256
- Aronschtaltung 311
- Atom

- als elektrischer Punktdipol 138
- als magnetischer Punktdipol 170, 195
- Atombaustein 1
- Aufpunkt 59, 89, 90, 104
- Auftriebskraft 65, 67
- Ausgangsnetzwerk 52
- Ausgleichsvorgang 334, 337
- Außenleiter 291
- Außenfeld (Kondensatorrandfeld) 111
- Avogadro-Konstante 383
- AWP *siehe* Anfangswertproblem
- Azimut 388, 389

- Bahnstromgenerator 309
- Balanciertheit
 - Drehstromsystem 308
- Basiseinheiten
 - des SI (Tabelle) 380
- Batterie 8
- Beschleunigung
 - substantielle 162
- Betrags-Frequenzgang 269
- Betriebskapazität
 - elektrische 114
- Bewegungsgleichung 162
 - von Navier und Stokes 162
- Bezugsfläche 101
 - Potenzial 103
- Bezugsknoten
 - Potenzial 40
- Bezugsorientierung 2
- Bezugspfeil 2
- Bezugspfeilsystem *siehe* Pfeilsystem
- Bezugspotenzial 69, 147
- Bezugspunkt 69
 - Leistungsmessung
 - Drehstrom 310
 - Potenzial 27, 100
- Bezugsrichtung 10
- Bezugsspannung
 - Drehstrom 294
- Bilanzbegriff 73
- Bilanzhülle 5, 105, 122
- Bilanzhülle 119
- Bilanzinstrument 73

- Bilanzvolumen 67
- Bildstrom 305
- Bindungen
 - mechanische 119
- Blindleistung 276, 277, 279, 321
 - Drehstrom 308
 - periodische Größen 318
- Blindleitwert 268
- Blindspannung 277
- Blindstrom 261, 277
- Blindwiderstand 268
- Brechungsgesetz
 - Elektrostatik 108
 - Magnetfeld 202
 - stationäres Strömungsfeld 151
- Brennstoffzelle 8

- $\cos \varphi$ 274
- Cosinus-Funktion 256
- Coulombkraft 87, 89, 90, 97, 115, 121, 127, 141
 - Strömungsfeld 147

- Dämpfungsgrad 269, 271
- Definitionslücke
 - Kennlinie 324
- δ -Funktion 348
- Determinante 353
- DGL. *siehe* Differentialgleichung
- diamagnetisch 197
- Dichte
 - der Masse 70
- Dielektrikum
 - homogen und isotrop 90, 93
- Differentialgleichung
 - homogene 341
 - inhomogene 341
 - lineare 340
- Differentiation einer harmonischen Schwingung 257
- Dipol
 - elektrischer 93
 - Hertz'scher 247
 - magnetischer 170, 190
- Dipolantenne 242
- Dipolfeld

- elektrisches 106
- Dipolmoment
 - elektrisches 94, 138
 - magnetisches 168, 194
 - Zylinderspule 203
- Dipolmomentdichte *siehe* Polarisation
- Dirac, P. 348
- Distribution 348
- Divergenz 387–389
 - eines Vektorfeldes 71, 95
- Divergenz eines Vektorfeldes 70, 74
- Doppelleitung
 - Feldbild 133, 406, 417
- Dreher 293
- Drehfeld 424
- Drehmoment
 - auf Dipol 93
 - auf stromführende Leiter 192
 - auf Testspule 168
- Drehoperator 293, 305
- Drehspannungsquelle
 - symmetrische 294
- Drehstrom 291, 292
- Drehstromgenerator
 - symmetrischer 293
- Drehstromlast
 - symmetrische 293
- Drehstromsystem
 - symmetrisches 293
 - unsymmetrisches 299
- Drehsystem 296
- Dreieck 292
- Dreieck-Stern-Umwandlung 54
- Dreieckelektrode
 - im elektrostatischen Feld 408
- Dreieckschaltung 294–297, 301, 403
- dreiphasig 292
- Driftgeschwindigkeit 144
- Driftladung 5, 86, 149, 157
- Driftladungsdichte 144, 172
- Druck in einer Flüssigkeit 70
- Druckabfall
 - Analogie 14, 164
- Druckerhöhung
 - Analogie 14, 159, 164
- Druckkraft 66
- Druckspannung 69
- Druckverlust 164
- Durchflutung
 - elektrische 181
- Durchflutungsgesetz 238
- Durchflutungssatz 179, 182, 183, 196, 197, 202, 215
- Dynamoblech 200
- Ebene
 - komplexe 254
- Effektivwert 251, 320
- Effektivwertzeiger 255
- Eigendämpfung 270, 355
- Eigenfunktion 342
 - als Erregung eines Netzwerkes 345
- Eigenkreisfrequenz 270, 273, 355
- Eigenlösung 342, 363
- Eigenvektor 354, 363
- Eigenwert 273, 340, 342, 353, 361, 363, 369
 - in der komplexen Ebene 356
 - mehrfacher 357, 360
 - reeller 355
 - Schwingkreis 270
- Eigenzeitkonstante 340, 342
 - Kondensator 155
- Eindeutigkeit
 - Netzwerk 21, 40, 41
- Eingangswiderstand 56
- Einheiten
 - abgeleitete des SI (Tabelle) 381
- Einheitsmatrix 306
- Einheitstensor 76
- Einheitsvektor *siehe* Einsvektor, 387–389
- Einheitszeiger 260
- einphasig 292
- Einschaltstromstoß 313
- Einschaltvorgang *siehe* Schaltvorgang
- Einsvektor 88, 89
 - in kartesischer Darstellung 390
- Einteilung der Felder 248
- Eisen
 - magnetische Permeabilität 202

- Eisendrossel 364
- Eisenerz 167
- Eisenkreis
 - magnetischer 204
- Eisenstäbe
 - parallele, im Magnetfeld 212
- elektrisch neutral 2
- Elektrochemie 7
- Elektrode
 - polarisierte 134
- Elektrodenpotenzial
 - elektrisches 114
- Elektrolyt 6, 7
- Elektromagnet 204
- Elektron 1
- Elektronen-Ruhemasse 383
- Elektronenstrom 6, 144
- Elektrostatik 85, 143
 - Zusammenfassung 142
- Elektrostriktionskraft 129
- Elektrotechnik
 - Einteilung 441
- Elementardipol 197
- Elementarladung 1, 383
- EMK *siehe* Kraft, elektromotorische
- Energie
 - als Linienintegral 60
 - des elektrostatischen Feldes 115
 - des Magnetfeldes 233
 - elektrische 8, 9, 115, 120
 - nichtelektrische 8, 119
 - potentielle 115
 - im Gravitationsfeld 118
- Energiedichte
 - elektrisches Feld 116
 - Magnetfeld 235
- Energieerhaltungssatz 8, 25, 32, 34, 115, 118, 120, 233, 320
- Erdmagnetfeld 175, 179
- Erdung
 - Faraday-Käfig 136
- Erregergröße
 - Netzwerk 334, 335
- Erregerstrom
 - Magnetkreis 205
- Erregung 43
 - elektrische *siehe* Flussdichte, elektrische, 91, 141
 - harmonische 345
 - magnetische 179
- Ersatzleitwert 29
- Ersatzmodell 47
- Ersatznetzwerk 51
- Ersatzquelle 47
- Ersatzschaltbild 366
 - einphasiges 299
- Ersatzschaltung
 - einphasige 297
- Ersatzspannungsquelle 48
- Ersatzstromquelle 48
- Ersatzverbraucher 30
- Ersatzwiderstand 28
- Erzeugerpeilsystem 10
- ES *siehe* Erzeugerpeilsystem
- Euler'sches Rückwärtsverfahren *siehe* Rückwärtsverfahren
- Euler-Formel 254
- Exponentialfunktion
 - komplexe 253
- Exponentialquelle 344
- Faden
 - geladener 131
- Fallbeschleunigung *siehe* Gravitationsbeschleunigung
- Faraday-Käfig *siehe* Käfig, Faradayscher
- Faraday-Konstante 6, 383
- Faradaysches Gesetz
 - erstes 6
- Feld
 - dreidimensionales 131
 - ebenes 131, 176
 - elektrisches
 - Berechnung 91
 - homogenes 60, 61, 77, 116
 - inhomogenes 116
 - konservatives 61
 - magnetisches 167
 - quellenfreies 70
 - statisches 60

- zweidimensionales 131
- zweier Punktladungen 116
- zylindersymmetrisches 172
- Feldbild
 - elektrisches
 - graphisches Verfahren 131
 - paralleler Elektroden 132
 - Umdeutung 132
- Feldbilder 74, 76, 77, 405
- Feldbildskizze 131
- Feldenergie
 - einer Punktladung 117
 - eines Kondensators 115, 120
 - elektrisches Feld 115, 119
 - gegenseitige elektrische 117
 - Magnetfeld 233
 - zweier Punktladungen 117
- Felder
 - Einteilung 248
- Feldfreiheit
 - von Leitern in der Elektrostatik 108
- Feldgröße 59
- Feldkonstante
 - elektrische 88, 383
 - magnetische 172, 383
- Feldlinie 81, 105, 133
 - bei Zylindersymmetrie 420
- Feldspannungen
 - fiktive mechanische
 - im elektrischen Feld 121, 126
 - im Magnetfeld 208
- Feldstärke
 - eingeprägte elektrische 149, 191
 - elektrische 89, 104
 - magnetische 179, 197
 - nichtelektrische *siehe* Feldstärke, eingeprägte elektrische
- Feldtheorie 59
- FEM *siehe* Finite-Elemente-Methode
- Fernfeld
 - magnetisches
 - ebene Leiterschleife 189
- Fernpotenzial
 - eines elektrischen Dipols 138
- Fernwirkung 87, 88, 121
- Fernwirkungsgesetz 88
- ferrimagnetisch 197
- Ferroelektrikum 139
- ferromagnetisch 197
- Festkörperphysik 198
- Finite-Elemente-Methode 237
- Fläche 62, 73
 - als Bilanzbegriff 73
 - bewegte 72
- Flächenelement
 - vektorielles 62
- Flächeninhalt 73
- Flächenkraftdichte
 - Elektrode 126
 - Isolierstoffgrenzfläche 128
 - Magnetstoffgrenzfläche 210, 211, 213
- Flächenladungsdichte
 - elektrische 86, 107, 108, 111
- Flächennormale 65
 - Grenzfläche
 - Elektrostatik 108
- Flächenvektor
 - einer Leiterschleife 193
- Flüssigkeit
 - inkompressible 64, 71, 159, 177
- Flüssigkeitsströmung 145
- Fluss
 - des Stromdichtevektors 145
 - eines Skalarfeldes 63
 - eines Vektorfeldes 62
 - elektrischer 94, 177
 - magnetischer 176
 - durch leiterparalleles Rechteck 178
- Flussdichte 62
 - elektrische 91, 141, 177
 - magnetische 168, 177
- Flussdichte-Koerzitivfeldstärke 200
- Flusskanal
 - elektrischer 133
- Folie
 - leitende 131
- Formelsammlung 395
- Formfaktor 253

- Fotos
 - elektrotechnischer Produkte 427
- Fourier-Analyse 314
- Fourier-Koeffizient 314
 - komplex 314
 - reell 314
- Fourier-Nullphasenwinkel 314
- Fourier-Synthese 316
- Freileitung 114
- Frequenz 251
- Frequenzgang 269
- Führungseinrichtung
 - mechanische 97
- Funktion 324, 327
 - gebrochen lineare 283, 285
- Galvanisierbad 8
- Gauß'scher Satz *siehe* Integralsatz von Gauß
- Gegeninduktivität 230, 232
- Gegensystem 305
- Generatorbezugsstrang 298
- Gesetz
 - Ohm'sches 15, 147
 - als Kräftegleichgewicht 149
 - komplexes 263
 - vektorielles 148
 - von Biot und Savart 174, 184, 185, 187
- Gleichgewicht
 - statisches 88, 122, 149
- Gleichquelle 343
- Gleichrichtwert 252
- Gleichstromleitung 57
- Gleichstromnetzwerk
 - lineares 43
 - nichtlineares 323
- Gleichungen
 - konstitutive 405
 - Maxwell'sche 238, 384, 405
- Gleichungssystem
 - lineares 330
- Gleichwert 251, 314
- Gleichwertleistung 318
- Glimmlampe 326, 366
 - Kenlinie 324
- Gradient 387–389
 - des elektrischen Potentials 104
 - eines Skalarfeldes 65, 69
- Graphit
 - Widerstand 17
- Gravitationsbeschleunigung 70, 89
- Gravitationsfeld 62, 89, 115, 118, 120
- Gravitationskonstante 88, 383
- Gravitationskraft 88, 89
- Grenzfläche
 - im elektrostatischen Feld 105, 129
 - im Magnetfeld 151, 201
 - im stationären Strömungsfeld 151
 - ladungsfreie 107
- Grundharmonische 314
- Grundkreisfrequenz 314
- Grundscheinleistung 318
- Güte 269
- [HaGa] VI
- Hagen und Poiseuille
 - Widerstandsgesetz 164
- Halbkreisender
 - Feldbild 413
- harmonisch 249
 - periodische Größe 314
- hartmagnetisch 198–200
- Hauptrichtung
 - Feldspannung, elektrisches Feld 124
 - Feldspannung, Magnetfeld 210
- Hauptspannung
 - Feldspannung
 - elektrisches Feld 124
 - Magnetfeld 210
- Hilfsfunktion
 - komplexwertige 256
- Hilfsnetzwerk 310
- Hilfspunkt 310
- Homogenität
 - Feld 60
- Hubmagnet 206
- Hülle
 - als Bilanzbegriff 73
- Hüllenfluss 71
 - der elektrischen Flussdichte 91, 96
 - eines Skalarfeldes 65

- eines Vektorfeldes 64
- elektrischer 94
- Hyperbel-Sinusfunktion 363
- Hysteresegrenzkurve 199
- Hystereseschleife
 - partielle 200
- imaginär 253
- Imaginärteil 254
- Impedanz 264, 267, 268, 277
 - komplexe 264, 268, 277
- Impedanzortskurve 286
- Impulserregung 347
- Induktion
 - magnetische *siehe* Flussdichte, magnetische, 171
- Induktionsgesetz 214, 238
- Influenz
 - elektrische 134
 - Feldbild 411
- Influenzladung
 - elektrische 134–136
- Informationsspeicherung
 - magnetische 200
- Innenimpedanz
 - Drehstromgenerator 294
- Innenwiderstand
 - Quelle 36, 49
- instationär 333
- Integral
 - als Summe 93
- Integralsatz
 - von Gauß 113
 - von Gauß 71, 91, 94–96, 105, 109–111, 115, 124, 130, 134–136, 140, 141
 - von Stokes 71
- Integration einer harmonischen Schwingung 257
- Intuition 203
- Ionenstrom 6
- Isolierstoff
 - im elektrostatischen Feld 411
 - Polarisation 139
- Iteration 327
- Jakobi-Matrix 330, 331
- Käfig
 - Faradayscher 134, 136
- Kapazität
 - und Leitwert
 - Analogie 153
 - elektrische 109
- Kartoffel 73
- Kennkreisfrequenz 269
- Kennlinie
 - statische 324
 - Widerstand 324
- Keramik
 - Permittivität 91
- Kettennetzwerk 56
- Kirchhoff'sche Sätze
 - bei periodischen Größen 320
- Kirchhoffscher Knotensatz *siehe* Knotensatz, Kirchhoffscher
- Kirchhoffscher Maschensatz *siehe* Maschensatz, Kirchhoffscher
- Klemme 292
- Klemmenspannung
 - reale Spannungsquelle 31
- Knick
 - Zeitfunktion 315
- Knoten
 - Netzwerk 21, 146
- Knotengleichung 23
- Knotenpotenzial 25, 27
- Knotenpotenzialverfahren 40
- Knotensatz
 - Kirchhoff'scher 22, 41, 87, 146, 165, 321
 - Strömungsfeld 146
 - magnetischer 204, 205
- Knotenspannung 27
- Knotensumme 23
- Koaxialkabel
 - Feldbild 132
- Koenergie
 - magnetische 237
- Koerzitivfeldstärke 200
- Kommutierungskurve 200
- Kompassnadel 203

- Kompensationskreisfrequenz 271, 288
- Komplementfläche 182
- komplexe Darstellung harmonischer
Zeitverläufe 253
- Komponenten
 - der Stromdichte 144, 145
 - eines Vektors X
 - orthogonale 260
 - physikalische 306
 - symmetrische 304
- Kondensator 109, 115, 120
 - Kurzschluss 350
 - Reihenschaltung 111
 - Spannungsteilerregel 112
 - Verschiebungsstrom 184
- Kondensatorplatte 166
- Konduktanz 268
- konjugiert-komplex 256
- Konservativität eines Feldes 61
- Konstitutivgleichung 384
- Kontinuitätsgleichung
 - der Ladung 146
 - der Strömung 162
- Kontrollbegriff *siehe* Bilanzbegriff
- Kontrollquerschnitt 2
- Kontrollvolumen 86, 146
- Konvergenz
 - Newton-Verfahren 331, 332
- Koordinaten
 - der Stromdichte 145
 - eines Tensors 75
 - eines Vektors X , 66, 74
 - kartesische 387
 - kartesische, bei grad, div und rot
74, 76
 - kartesische, Stromdichte 145
 - sphärische 389
 - zylindrische 388
- Koordinatentransformation
 - von Vektorfeldern 390
- Koordinatenumrechnung 387–389
- Kopplung
 - der Felder (Tabelle) 384
 - magnetische 230
- Kraft
 - auf bewegte Ladung 190
 - auf Elektrode 125
 - auf Isolierstoffgrenzfläche 128
 - auf kleine Leiterschleife 194
 - auf Leiterschleife 192, 193
 - auf Linienleiter 192
 - auf magnetische Polfläche 212
 - auf Messspule 170
 - auf Polarisationsladung 141
 - auf stromführende Leiter 192
 - chemische 13
 - elektromotorische 14
 - magnetische 167
 - nichtelektrische 149
 - photovoltaische 13
- Kraftdichte
 - im elektrostatischen Feld 129
 - magnetische 191, 213
- Kreis
 - Ortskurve 284
- Kreisfrequenz 251, 256
- Kreisstrom
 - atomarer 167
 - parallele Spulen 359
- Kugel
 - geladene 89
- Kugelkondensator
 - Vergleich mit Zylinderkondensator
409
- Kugelkoordinate 389
- Kupfer
 - Widerstand, Temperatur 17
- Kurzschluss 31, 33
- Kurzschlussstrom 49, 50
- Ladebetrieb
 - Akkumulator 9
- Ladung
 - bewegte 172
 - elektrische 1
 - wahre 2, 5, 86
- Ladungsbewegung
 - ungeordnete 2
- Ladungsdurchsatz 2, 9, 143, 334
 - als Zustandsgröße 362
- Ladungselement

- elektrisches 92
- Ladungserhaltungsgesetz 4, 22, 86, 87, 146
- Ladungserhaltungssatz 87
- Ladungserhaltungssatz 146
- Ladungsmesser 2
- ladungsneutral 146
- Ladungsströmung 143
- Ladungsteilerregel
 - Kondensatoren 112
- Ladungsträger 2, 143
- Ladungsverteilung
 - Elektrostatik 103
- Längswiderstand 57
- Laplace-Operator 239, 387–389
- Leerlauf 31, 33
- Leerlaufspannung 49, 50
- Lehr- und Forschungsgebiete der Elektrotechnik 444
- Leistung 157
 - aus den Außenleitergrößen 309
 - Drehstrom 307
 - elektrische 8
 - im Strömungsfeld 157
 - periodische Erregung 316
 - Wechselstrom 274
- Leistungsbilanz
 - Strömungsfeld 157
- Leistungsdichte
 - im Strömungsfeld 157
- Leistungsfaktor 274
- Leistungsmesserschaltung
 - Drehstrom 311
- Leistungsschwingung 274
- Leiter
 - Feldfreiheit
 - in Elektrostatik 108
 - metallischer 6
 - stabförmiger 17
 - zwei zylindrische
 - Feldbild 132
- Leiterschleife
 - Dipolmoment 194
 - eben, Fernfeld 189
 - ebene 188, 193
 - Kraft auf kleine 194
 - Magnetfeld 172, 173
 - magnetisches Skalarpotenzial 190
 - unebene 193
- Leiterumlenkung
 - Strömungsfeld 414
- Leitfähigkeit
 - spezifische elektrische 17
- Leistungsstrom 185
- Leistungsstromdichte 185
- Leitwert *siehe* Widerstand
 - elektrischer 15
 - komplexer 267, 268
 - magnetischer 233
 - Ohm'scher 15
 - und Kapazität
 - Analogie 153
- Lenz 216
- Lenz'sche Regel *siehe* Regel, Lenz'sche
- Lichtbogen 350
- Lichtgeschwindigkeit 172, 241
 - im Vakuum 383
- linear abhängig 354
- Linearität
 - Netzwerk 44
- Liniendipol
 - Feldbild 132
- Linienintegral 60
- Linienladung
 - Feld 131
- Linienladungsdichte
 - elektrische 86
- Linienleiter
 - langer 187
- Linienleiterschleife
 - magnetisches Skalarpotenzial 187
- Linienpektrum 316
- Lösung
 - analytische 340
 - erzwungene 341
 - numerische 340
 - partikuläre 341, 351, 352, 363
 - stationäre 262
- Lötspunkt
 - Strömungsfeld 412

- Lorentz-Eichung 239
- Lorentzkraft 191, 194
- Lorentzkraftdichte 191, 213
- Loschmidt-Konstante 383
- Luft
 - Permittivität 91
- Luftblase
 - im Isolierstoff 91
- Luftspalt
 - im magnetischen Kreis 204, 206
- Lufttransformator
 - Feldbild 422
- Magnetblech 198
- Magnetfeld 120
 - homogenes 193
 - in Stoffen 195
 - inhomogenes 193
 - langer Linienleiter 175
 - Ringspule 202
 - Zusammenfassung 247
 - Zylinderspule 202
- magnetisch gekoppelte Kreise 266
- magnetisch neutral 186
- Magnetisierung 195, 197
- Magnetisierungskennlinie (-kurve)
 - 198–200, 234, 363
- Magnetisierungsstromdichte 196
- Magnetismus
 - permanenter 195
- Magnetkreis
 - mit Eisen 206
- Magnetostatik
 - Feldbilder 415
- Magnetostruktionskraft 213
- Magnetstahl 198
- Masche
 - Netzwerk 21
- Masche identifizieren 38
- Maschengleichung 26, *siehe* Spannungsgleichung
- Maschensatz
 - Kirchhoff'scher 25, 26, 39, 149, 150, 165, 215, 219, 321
 - magnetischer 204–206
- Maschenstrom 23, 24
- Maschenstrom festlegen 39
- Maschenstromverfahren 39
- Masse
 - Analogie zur Induktivität 334
- Massestrom 6
- Masseverlust
 - gewinn bei Elektroden 8
- Materialkonstanten
 - Tabelle 384
- Materie
 - elektrisches Feld in 90
- Matrix-Exponentialfunktion 361
- Maximalwert 251
- Maxwell'sche Gleichungen *siehe* Gleichungen, Maxwell'sche
- Maxwell'sche Spannung *siehe* Spannungszustand, Maxwell'scher
- Mehrelektrodenanordnung
 - elektrostatische 113
- Mehrphasengenerator 291
- Mehrphasenspannungsquelle 292
- Mehrspeichernetzwerk 350
- Mensch
 - im elektrostatischen Feld 410
- Meridianebene
 - des Hertz'schen Dipols 246
- Metall
 - Widerstand 17
- Metallkäfig
 - im elektrostatischen Feld 136
 - Schirmwirkung 136
- Metalleiter 144
- Minimalwert 251
- Mischgröße 252, 260
- Mitsystem 305
- Mittelleiter 292
- Mittelpunkt 292
- Mittelwert
 - arithmetischer 251
- Molekül
 - als elektrischer Punktdipol 138
- Molmasse 6
- Monotonie
 - Kennlinie 331
- Nacheilung 260

- Nahwirkung 89, 121
- Naturkonstanten
 - Tabelle 383
- Naturmagnet *siehe* Permanentmagnet
- Navier 162
- Netzwerk
 - aktives 31
 - ein Speicher 340, 341
 - größeres 358
 - lineares 44, 249
 - harmonische Erregung 249
 - periodische Erregung 313
 - magnetisches 205
 - nichtlineares 323
 - passives 30
 - zwei Speicher 350
- Netzwerkberechnung 37, 43
- Netzwerkreduktion auf Ersatzquellen 47
- Netzwerkskoordinate 326
- Neukurve 200
- Newton-Verfahren 206, 327, 364
 - mehrdimensional 329
- nichtharmonisch 251
- Normal-Druckspannung
 - Hüllenfluss einer 65
- Normaleneinsvektor 123
- Normalform
 - System linearer Differentialgleichungen 351, 358
- Normalkoordinate
 - eines Vektors 62
- Normalspannung
 - Fluss einer 64
- Normierung
 - Ortskurve 288
- Nullphasenwinkel 251
- Nullphasenzeit 250, 251
- Nullquelle 342
- Nullstrom 306
- Nullsystem 305
- Nullung bei Quellen 45
- numerische Lösung *siehe* Lösung, numerische
- Oberfläche
 - Hüllenfluss durch 64
- Oberschwingungsleistung 318
- Ohmsches Gesetz *siehe* Gesetz, Ohmsches
- Orientierung
 - der Flächennormalen 145
- Originalnetzwerk 51
- Originalstrom 305
- Ortskurve 281
 - größerer Netzwerke 288
- Ortsvektor 59, 387–389
- Parallelität
 - von Vektoren 74
- Parallelschaltung 28, 29
 - Kondensatoren 112
- paramagnetisch 197
- Pendelmoment 309
- Periode 250
 - periodisch 250
- Permanentmagnet 167, 196, 200, 203
 - Feldbild 419
- Permeabilität
 - magnetische 197
 - Vakuum 172
 - relative magnetische 197
- Permittivität 90
 - des Vakuums 88
 - elektrische 93, 103
 - relative 90, 141
- Permittivitätsgrenzfläche 108
- Pfeilsystem 10
- Phasen-Frequenzgang 269
- Phasenfolge 292, 293
- Phasenverschiebungswinkel 253, 264, 277–279
- Platte
 - geladene, ausgedehnte 130
- Plattenerder
 - Strömungsfeld 413
- Plattenkondensator 110, 111
- Poisseeuille 164
- Polarisation
 - elektrische 136, 138
 - homogene elektrische 140

- magnetische 195, 197, 198
- Polarisations-Flächenladungsdichte 140
- Polarisations-Koerzitivfeldstärke 200
- Polarisations-Raumladungsdichte 140
- Polarisationskurve
 - magnetische 198
- Polarisationsladungen
 - elektrische 141
- Polarität 1
 - Ladung 88
- Polfläche
 - magnetische 211
- Polladung 224
- Polung
 - Ladungsmesser 3
- Polygonleitwert 53
- Polygonnetzwerk 52
- Polynom
 - charakteristisches 353
- Potenzial 405
 - einer Punktladung 102
 - eines elektrisch polarisierten Körpers 140
 - eines elektrischen Dipols 137
 - eines Vektorfeldes 61, 66, 69, 77
 - eines widerstandsbehafteten Leiters 147
 - elektrisches 27, 40, 96, 100, 103, 104, 133
 - magnetisches
 - skalares 185, 187
 - vektorielles 185
- Potenzialfeld 186
- Potenzialgefälle
 - elektrisches 104
- Potenzialkraft 162
- Potenziallinie
 - elektrische 106
- Potenzialrichtigkeit
 - Zeigerbild 266, 296
- Potenzialtrichter
 - elektrischer 106
- Präsenzwissen 395
- Prizip
 - von Archimedes 73
- Produkte
 - der Elektrotechnik 427
- Proton 1
- Protonen-Ruhemasse 383
- Pumpe 159
- Pumpenkreis 159
- Pumpenkreislauf 159
- Punkt dipol
 - elektrischer 138
 - Feldbild 139
 - magnetischer 195
 - magnetischer und elektrischer 190
- Punktladung
 - bewegte 171
 - elektrische 86, 89, 92, 99, 103, 117
- Punktmasse 88, 89
- quasistatisch 323
- Quelle 8, 325
 - der elektrischen Stromdichte 146
 - des elektrischen Feldes 90, 109
 - fiktive
 - in Speichernetzwerken 360
 - gesteuerte 36
 - ideale 36
 - in Feldbildern 77
- Quellendichte 70
- Quellenfeld
 - wirbelfreies 78, 79, 95, 99
- Quellenfreiheit
 - eines Vektorfeldes 70
 - Magnetfeld 176, 177, 221
 - Stromdichte 146, 221
- Quellengröße 19
- Quellenspannung 150
- Quellenstrom 14
- Querwiderstand 57
- Randkurve
 - einer Fläche 67
- Rasterkondensator 133
- Rasterverhältnis
 - Feldbildskizze 133
- Raumladungsdichte
 - elektrische 85, 86, 139

- wahre elektrische 140
- Raupunkt 59
- Raumwinkel 189
- Reaktanz 268
- Reaktionskraft
 - mechanische 122
- Realteil 254
- rechtshändig 94, 168, 171, 176
- Regel
 - Lenz'sche 216
- Reibung
 - innere 164
- Reihenschaltung 28
 - Kondensatoren 111
- Reihenschwingkreis 268, 272, 287, 353
 - Ortskurve 282
- Relieffläche
 - elektrisches Potenzial 102
- Remanenz 200
- Remanenzinduktion 200
- Remanenzmagnetisierung 200
- Remanenzpolarisation 200
- Resistanz 268
- Resonanz 271, 282, 288
- Resonanzfall 345
- Resonanzfrequenz 271
- Retardierung 242, 243
- Richtungsableitung 65
- Ring 291
- Ringintegral *siehe* Umlaufintegral
- Ringspannung 292
- Ringspule
 - Magnetfeld 202
- Ringstrom 292
- Rohrströmung
 - laminare nichtturbulente 159
- Rotation 387–389
 - eines Vektorfeldes 67
- Rückwärtsverfahren
 - Euler'sches 335, 338, 364
- Sättigung
 - magnetische 200
- Satz
 - Gauß'scher 71, 91, 94–96, 105, 110, 113, 115, 124, 134–136, 140
 - Feldberechnung 130
 - Stokes'scher 71
- Savart *siehe* Gesetz von Biot und Savart
- Schätzlösung 328, 330
- Schaltelement 283
- Schalter
 - realer 350
- Schaltvorgang 334, 361
- Schaltzeichen 386
 - Tabelle 386
- Scheinleistung 274, 277
 - Drehstrom 308
 - komplexe 277, 278
 - periodische Größen 318
- Scheinleitwert 268
- Scheinwiderstand 264, 268
- Scheitelfaktor 253
- Scherzähigkeit 159
- Schirmung
 - elektrostatischer Felder 134
 - elektrostatisches Feld 407
 - Magnetfeld 421
- Schleife
 - (geschlossener Weg) 61
- Schnittprinzip
 - der Mechanik 208
- Schrittvektor 97
- Schrittweite
 - numerische Integration 337
- Schwerefeld *siehe* Gravitationsfeld
- Schwerkraft
 - volumenbezogene 69
- Schwingbreite 251
- Schwund
 - magnetischer 220, 221, 223
- Selbstentladung
 - Kondensator 155
- Selbstinduktivität 225, 233
 - einer Spule 228
- Selbstinduktivität 362
- Senke
 - des elektrischen Feldes 90, 109
- SI-Einheit IX, 380, 381
- sinusoidal 250

- Skalar 59
- Skalarfeld 69
 - Fluss 63
- Skalarpotenzial *siehe* Potenzial eines Vektorfeldes
- Skalarprodukt 97
- Solarzelle 13
- Spannung
 - eingeprägte elektrische 14, 150
 - elektrische 8, 9, 96, 98
 - Vergleich mit magnetischer 180
 - induzierte 218, 220, 222, 223
 - innere elektrische *siehe* Spannung, eingeprägte elektrische
 - magnetische 179, 180, 189
 - motorisch induzierte 218, 219, 223
 - transformatorisch induzierte 214, 223
- Spannungsbezugspfeil
 - als stilisierter Integrationsweg 97, 150
- Spannungseinprägung 47
- Spannungsgleichung 26, 38, 218
 - bewegte Leiterschleife 218
 - Matrixform 303
 - ortsfeste Leiterschleife 215
 - Spule 229
- Spannungsinduktion
 - in bewegten Leiterkreisen 217
- Spannungsquelle
 - fiktive, in Speichernetzwerken 360
 - gesteuerte 36
 - ideale 13, 30
 - reale 30
- Spannungsteilerregel 28
 - Kondensatoren 112, 359
 - Kondensatoren ungleicher Anfangsladung 359
- Spannungstensor 124, 210
- Spannungsumkehr
 - Stromquelle 32
- Spannungsvektor
 - mechanischer 122, 123
- Spannungszustand
 - Maxwell'scher 124, 130, 213
- Speicher
 - nichtlinearer 362
- Speichernetzwerk 361
- Spektrum 316
- Sprung
 - Zeitfunktion 315, 333
- Sprungstellenverfahren
 - Fourier-Analyse 314
- Spule
 - Abschalten 349
 - mit Eisenkern, Einschaltvorgang 363, 367
 - nichtlineare 363
- Spulenfluss *siehe* Verkettungsfluss, magnetischer
- Stabilität 327, 366, 368
- stationär 313
- Stern 291
- Stern-Dreieck-Umwandlung 54, 304
- Stern-Polygon-Umwandlung 52
- Sternleitwert 53
- Sternpunkt 52, 292
- Sternpunktleiter 292
- Sternschaltung 294–296, 300, 301, 403
- Sternspannung 292
- Sternstrom 292
- Störfunktion 340
- Störvektor 351
- Stoffe, magnetische, Einteilung 197
- Stoffgesetz 148
- Stoffwerte
 - Tabelle 384
- Stokes 162
- Stoßfunktion 348
- Strang 292
- Strangspannung 292
- Strangstrom 292
- Strömung
 - laminare 163
- Strömungsfeld
 - aktives 150
 - inhomogen 145
 - passives 149, 157
 - stationäres elektrisches 143
- Zusammenfassung 165

- Strömungsgebiet
 - Magnetfeld 172
- Strömungsgeschwindigkeit 64, 71, 145, 177
 - Fluss der 63
- Strömungswiderstand 159
- Stromänderungsgeschwindigkeit einer Spule 229
- Strombelag 201
 - der Magnetisierung 196
- Strombezugspfeil 145
 - als stilisierte Flächennormale 145
- Stromdichte
 - elektrische 143, 172, 177
 - homogene 144, 148
 - wahre 196
- Stromdichtefeld 143
- Stromeinprägung 47
- Stromgleichung 23
- Stromkreis 8
 - einfacher 13, 18
 - nichtlinearer 19, 326
 - verzweigter 21
- Stromlinien
 - Verkettung mit einer Randkurve 182
- Stromortskurve 285
- Stromquelle
 - fiktive
 - in Speichernetzwerken 360
 - gesteuerte 36
 - ideale 13
 - reale 33
- Stromschiene
 - Feldbild 416
- Stromstärke
 - elektrische 9, 143
 - als Fluss 177
- Stromteilerregel 29
 - Spulen ungleicher Anfangsverkettungsflüsse 359
- Stromumkehr
 - Spannungsquelle 35
- Strömungsfeld 412
- Summe
 - harmonische 313
- Summensymbole XI
- Superpositionssprinzip *siehe* Überlagerungsprinzip
- Suszeptanz 268
- Suszeptibilität
 - magnetische 197
- Suszeptibilität
 - elektrische 141
- Symmetrie
 - zyklische 294
- Systemmatrix 351, 361
- Tabellenverzeichnis 377
- Teilkapazität
 - elektrische 113, 114
- Temperaturabhängigkeit
 - elektrischer Widerstand 17
- Temperaturfeld 59, 158
- Temperaturkoeffizient
 - elektrischer Widerstand 17
- Temperaturmessung 18
- Tensor 59, 74
 - schiefsymmetrischer (antimetrischer) 75
 - transponierter 75
- Tensorfeld 59
- Tensorsumme 75
- Testschaltung
 - Netzwerksumwandlung 53
- Topfmagnet
 - Feldbild 422
- Transformation
 - Zeiger 256
- Transformator 204, 267
- transient 334
- Transversalwelle 241
- Übergangsvorgang 325
- Überlagerungsprinzip 326
- Überlagerungsprinzip 43, 91, 103, 313, 363
- Überlagerungssatz *siehe* Überlagerungsprinzip
- Übertrager 267
- Umdeutung

- bekannter Feldbilder 132
- Umkehrfunktion 324
- Umlaufintegral 61, 174
- Umlaufspannung
 - elektrische 99, 107, 214
 - magnetische 179, 180, 202, 206
- Umlaufsumme 25, 26
- Vakuum
 - Permeabilität, magnetische 172
 - Permittivität 91
- VDE 441
- Vektor 59
 - axialer 170
 - parallel und antiparallel 76
 - polarer 170
- Vektoralgebra 60
- Vektordifferentialgleichung 338
- Vektorfeld 59
 - zentrales 90
- Vektorpotenzial
 - eines magnetisierten Körpers 195
 - magnetisches 185, 186
- Verbraucher 8
- Verbraucherpfilsystem 9, 10, 120, 261
- Verhältnisgrößen (Tabelle) 383
- Verkettung
 - Durchflutung mit Randkurve 182
- Verkettungsfluss
 - magnetischer 227, 234, 334
 - als Zustandsgröße 362
- Verlustleistung
 - Quelle 32
- Verlustwärmeleistung 158
- Verschiebung
 - Divergenz der 71
 - mechanische 64
 - virtuelle
 - im elektrostatischen Feld 118
 - im Magnetfeld 236
- Verschiebungsstrom 185, 238
- Verschiebungsstromdichte 185
- Vierleiter-System
 - Drehstrom 311
- Vierpol 232
- Volumen
 - als Bilanzbegriff 73
- Volumenableitung 65, 67, 70
- Volumenstrom 63
 - Analogie 3, 145, 159
- Volumenzunahme
 - als Hüllenfluss 64
 - relative 71
- Vorgeschichte
 - magnetische 197, 200
- Vorsatzzeichen
 - zu Einheiten (Tabelle) 380
- Vorwärtsverfahren
 - Euler'sches 335
- VS *siehe* Verbraucherpfilsystem
- Wärme 8
- Wärmeleistungsdichte
 - Joule'sche 157
- Wärmeverlust-Energiedichte 158
- Wassersäule 66
- Wechselgrößen 252
- Weg
 - als Bilanzbegriff 73
- Wegabhängigkeit
 - der elektrischen Spannung 217
 - der magnetischen Spannung 181
- Wegunabhängigkeit
 - der elektrischen Spannung 98, 217
- weichmagnetisch 199, 200
- Welle
 - ebene 240
 - elektromagnetische 215, 237
- Wellenausbreitung
 - Feldbild 425
- Wellengleichung 239, 425
- Wellenlänge 240
- Wellenwiderstand 242
- Wertigkeit bei Ionen 6
- Wicklungspunkt 232, 233, 267
- Widerspruchsfreiheit
 - Netzwerksaufgabe 333
- Widerstand 15
 - aktiver 325
 - differentieller elektrischer 15
 - elektrischer 15
 - komplexer 264, 268

- magnetischer 205
- nichtlinearer
 - elektrischer 205
- Ohm'scher 15
- spezifischer elektrischer 17
- variabler Querschnitt 156
- Widerstandsdraht 147, 156
- Widerstandsgesetz
 - von Hagen und Poisseuille 164
- Widerstandsnetzwerk
 - nichtlineares 323
- Windungszahl
 - Spule 228
- Winkelgeschwindigkeit 68
- Wirbel
 - in Feldbildern 77
- Wirbeldichte 68
- Wirbelfeld
 - Magnetfeld 176
 - quellenfreies 79, 80
- Wirbelfluss 72
- Wirbelfreiheit
 - der elektrischen Feldstärke 105
 - der elektrischen Feldstärke 135
 - des stationären Strömungsfeldes 150
 - eines Vektorfeldes 61, 69
- Wirbelstrom
 - in Blechen 423
- Wirk-Blind-Zerlegung 277
- Wirkleistung 274, 277, 279
 - Drehstrom 307
- Wirkleitwert 268
- Wirkspannung 261, 277
- Wirkstrom 261, 277
- Wirkungsgrad 32, 35
- Wirkungsgröße 19
- Wirkungsrichtung 10
- Wirkwiderstand 268
- Z-Diode, Kennlinie 324
- Zahl
 - komplexe 254
- Zeiger 255, 256
- Zeigerbild 265
 - Drehstrom 296
- Zeigerrechnung 261
- Zentralfeld 90, 99
- Zielnetzwerk 52
- Zirkulation *siehe* Umlaufintegral, 68, 72, 98
- Zugspannung
 - auf Elektrode 121
- Zusammenfassung
 - Elektrostatik 142
 - lineare harmonische Netzwerke 279
 - Magnetfeld 247
 - Strömungsfeld 165
- Zustandsgröße 334, 340
- Zustandsvektor 338, 351, 360
- Zwei-Wattmeter-Schaltung 311
- Zweielektrodenanordnung 109
- Zweig
 - Netzwerk 21
- Zweigstrom 23, 37
- Zweigstromverfahren 37
- Zweipol 10
 - linearer 49
 - nichtlinearer 323, 324
- Zweipolreduktion 50
- Zweipolzerlegung 51
- Zylinderelektrode
 - im elektrostatischen Feld 408
- Zylinderkondensator
 - Vergleich mit Kugelkondensator 409
- Zylinderkoordinate 388
- Zylinderkoordinaten 162, 176, 178
- Zylinderleiter
 - über leitender Ebene
 - Feldbild 132
- Zylinderspule
 - Feldbild 418
 - Magnetfeld 202
 - Vergleich mit Permanentmagnet 196