

# Inhaltsverzeichnis

## 1. Das elektrostatische Feld 1

- 1.1. Das elektrostatische Feld im leeren Raum 1
  - 1.1.1. Grundbegriffe 1
  - 1.1.1.1. Das Feld eines Dipols 18
  - 1.1.2. Das elektrostatische Feld bei Anwesenheit von leitfähigen Körpern 22
    - 1.1.2.1. Die Influenz 24
    - 1.1.2.2. Die Messung der elektrischen Verschiebung  $\mathbf{D}$  mit Hilfe der Influenz in einem Doppelscheibchen 25
  - 1.1.3. Die Kapazität 28
    - 1.1.3.1. Der Kugelkondensator 30
    - 1.1.3.2. Der Plattenkondensator 32
    - 1.1.3.3. Schaltungen von Kondensatoren 33
      - 1.1.3.3.1. Parallelschaltung von Kondensatoren 35
      - 1.1.3.3.2. Serienschaltung von Kondensatoren 35
    - 1.1.4. Die Berechnung von elektrostatischen Feldern und von Kapazitäten 37
      - 1.1.4.1. Potential und Feldstärke eines an seiner Oberfläche gleichmäßig geladenen, unendlich langen Zylinders. Kapazität eines Zylinderkondensators 38
      - 1.1.4.2. Potential eines gleichmäßig geladenen Stabes (Linienladung) von endlicher Länge 42
      - 1.1.4.3. Potential zweier unendlich langer, geradliniger, paralleler Linienladungen. Kapazität zweier nichtkoaxialer Zylinder 44
    - 1.1.5. Die Spiegelbildmethode 48
      - 1.1.5.1. Kapazität einer Einfachleitung gegenüber Erde 48
    - 1.1.6. Mehrleitersysteme 49
      - 1.1.6.1. Die Messung der Teilkapazitäten 54
      - 1.1.6.2. Teilkapazitäten einer Doppelleitung mit Berücksichtigung des Erdeinflusses 55
      - 1.1.6.3. Betriebskapazität 58

- 1.2. Das elektrostatische Feld bei Anwesenheit dielektrischer Materie 61
    - 1.2.1. Eigenschaften dielektrischer Stoffe 73
    - 1.2.2. Der homogen polarisierte Körper 79
    - 1.2.3. Die Differentialgleichungen der Felder bei polarisierter Materie 82
    - 1.2.4. Der mit homogener, isotroper Materie erfüllte Feldraum 83
      - 1.2.4.1. Der Fall konstanter (wahrer) Ladungen 88
      - 1.2.4.2. Der Fall konstanter Potentiale 90
    - 1.2.5. Der mit inhomogener, isotroper Materie erfüllte Feldraum 93
      - 1.2.5.1. Grenzflächen zwischen isotropen, dielektrischen Medien 93
      - 1.2.5.1.1. Der Mehrschichtkondensator 94
      - 1.2.5.2. Die Messung von  $\mathbf{E}$  und  $\mathbf{D}$  in festen Medien auf Grund der Bedingungen für Sprungflächen 97
      - 1.2.5.3. Isotropes Medium mit räumlich kontinuierlich veränderlichen Materialwerten 100
  - 1.3. Energie und Kräfte im elektrostatischen Feld 105
    - 1.3.1. Die Energie im elektrostatischen Feld 105
      - 1.3.1.1. Die Berechnung der Kapazität mit Hilfe der Energie 109
    - 1.3.2. Kraft und Drehmoment im elektrostatischen Feld 110
      - 1.3.2.1. Kräfte auf elektrisch geladene Körper im leeren Raum 111
      - 1.3.2.2. Kraft und Drehmoment auf einen Dipol 115
      - 1.3.2.3. Kraft und Drehmoment auf elektrisch geladene und polarisierte Körper im leeren Raum 116
      - 1.3.2.4. Kräfte auf Körper in polarisierbaren Flüssigkeiten und Gasen. Die ponderomotorische Kraft 121
      - 1.3.2.5. Das Prinzip der virtuellen Verschiebung 128
      - 1.3.2.6. Darstellung der Kräfte mit Hilfe von Spannungstensoren 130
      - 1.3.2.7. Drehmomente bei Körpern in polarisierbaren Flüssigkeiten und Gasen. Das ponderomotorische Drehmoment. Symmetrieverhältnisse der Spannungstensoren 133
  - 1.4. Literatur 137
- 
- 2. Das stationäre elektrische Strömungsfeld 138
    - 2.1. Grundbegriffe 138
      - 2.1.1. Stromstärke, Stromdichte 138
      - 2.1.2. Die Kontinuitätsgleichung der elektrischen Ladung 143
      - 2.1.3. Der elektrische Strom in metallischen Leitern 145
      - 2.1.4. Stromleitung durch mehrere Ladungsträgerarten und Konvektionsstrom 149
      - 2.1.5. Zweidimensionale (flächenhafte) Strömungsfelder 151

- 2.2. Das Ohmsche Gesetz 153
- 2.3. Die Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstandes 156
- 2.4. Der Stromübergang an der Grenzfläche zweier leitfähiger Medien 158
- 2.5. Die Berechnung stationärer Strömungsfelder 160
  - 2.5.1. Die Kugelelektrode im unendlich ausgedehnten, homogenen, isotropen Medium 160
  - 2.5.2. Das kugelsymmetrische Strömungsfeld in mehreren leitfähigen Medien 162
  - 2.5.3. Der Halbkugelerder 163
  - 2.5.4. Das Strömungsfeld zweier punktförmiger Elektroden 165
  - 2.5.5. Abschließende Bemerkungen 166
- 2.6. Schaltungsarten von Widerständen 166
  - 2.6.1. Serienschaltung von Widerständen 167
  - 2.6.2. Parallelschaltung von Widerständen 168
- 2.7. Bezugsrichtungen und Richtungsregeln 169
- 2.8. Die Energieumwandlung im stationären Strömungsfeld 174
- 2.9. Die elektrische Energiequelle 177
  - 2.9.1. Das galvanische Element 177
  - 2.9.2. Die stromlose (leerlaufende) elektrische Energiequelle 180
  - 2.9.3. Die stromführende (belastete) elektrische Energiequelle 182
  - 2.9.4. Die lineare elektrische Energiequelle 187
    - 2.9.4.1. Die Ersatzspannungsquelle 188
    - 2.9.4.2. Die Ersatzstromquelle 189
    - 2.9.4.3. Anwendung und Grenzen der beiden Ersatzschaltungen 191
- 2.10. Leistungsanpassung 192
- 2.11. Methoden zur Berechnung linearer elektrischer Netzwerke 194
  - 2.11.1. Die Kirchhoffschen Regeln 195
    - 2.11.1.1. Die erste Kirchhoffsche Regel: Die Knotenregel 195
    - 2.11.1.2. Die zweite Kirchhoffsche Regel: Die Maschenregel 198
  - 2.11.2. Die Leistungsgrößen und ihre Vorzeichen, Bezugsrichtungssysteme 200
    - 2.11.3. Anwendungsbeispiel 203
    - 2.11.4. Vermischte Netzwerke 208
      - 2.11.4.1. Die Berechnung mit Hilfe der Knoten- und der Maschenregel 208
      - 2.11.4.2. Das Rechnen mit der Maschenregel 210
      - 2.11.4.3. Die Methode der Maschenströme (Teilströme) 212
      - 2.11.4.4. Das Rechnen mit der Knotenregel 213
      - 2.11.4.5. Netzumwandlung 215

- 2.11.4.6. Das Superpositionsgesetz 216
- 2.11.4.7. Der Satz von der Ersatzspannungsquelle 218
- 2.12. Literatur 221

### **3. Das stationäre magnetische Feld 222**

- 3.1. Das stationäre magnetische Feld im leeren Raum 222
  - 3.1.1. Grundbegriffe 222
  - 3.1.2. Gegeninduktivität und Selbstinduktivität 235
  - 3.1.3. Die Berechnung von stationären magnetischen Feldern und von Induktivitäten 240
    - 3.1.3.1. Das Magnetfeld eines unendlich langen, geraden Leiters 240
    - 3.1.3.2. Das Magnetfeld in der Achse einer Kreisschleife 242
    - 3.1.3.3. Das Magnetfeld in der Achse einer Zylinderspule 243
    - 3.1.3.4. Das Magnetfeld und die Selbstinduktivität einer Ringspule 245
    - 3.1.3.5. Das Magnetfeld eines geraden Leiterstückes und eines aus solchen Leiterstücken zusammengesetzten Stromkreises 247
    - 3.1.3.6. Die (äußere) Selbstinduktivität einer Doppelleitung 250
    - 3.1.3.7. Die Gegeninduktivität zweier paralleler Doppelleitungen 252
    - 3.1.3.8. Bemerkungen zur Verwendung der Größen **B** und **H** 253
  - 3.2. Das stationäre magnetische Feld bei Anwesenheit magnetisierbarer Materie 254
    - 3.2.1. Grundbegriffe 254
      - 3.2.1.1. Die Elementarstromtheorie des Magnetismus 255
      - 3.2.1.2. Die Mengentheorie des Magnetismus 263
      - 3.2.1.3. Bemerkungen zu den beiden Theorien des Magnetismus 267
      - 3.2.1.4. Magnetischer Fluß und Polstärke 271
      - 3.2.2. Die atomistischen Grundlagen des Magnetismus 278
        - 3.2.2.1. Bahn- und Spindrehmoment 279
          - 3.2.2.1.1. Das Bahnmoment 279
          - 3.2.2.1.2. Das Spindrehmoment 282
          - 3.2.2.1.3. Der Einstein-de Haas-Effekt 282
        - 3.2.2.2. Der Diamagnetismus 283
        - 3.2.2.3. Der Paramagnetismus 286
        - 3.2.2.4. Der Ferromagnetismus 286
        - 3.2.2.5. Antiferromagnetismus, Ferrimagnetismus 290
      - 3.2.3. Eigenschaften magnetisierbarer Stoffe 291
      - 3.2.4. Der mit homogener, isotroper Materie erfüllte Feldraum 297
        - 3.2.4.1. Der homogene Magnetkreis 301
        - 3.2.4.2. Magnetomotorische Kraft, magnetische Spannung, magnetischer Widerstand und Leitwert 305
      - 3.2.5. Der mit inhomogener Materie erfüllte Feldraum 307

- 3.2.5.1. Grenzflächen zwischen isotropen magnetisierbaren Medien 308
- 3.2.5.2. Der inhomogene, weichmagnetische Kreis 310
- 3.2.5.2.1. Der weichmagnetische Kreis mit Luftspalt 312
- 3.2.5.2.2. Berechnungsbeispiel für einen weichmagnetischen Kreis mit Luftspalt 318
- 3.2.5.3. Der Dauermagnetkreis 321
- 3.2.5.3.1. Die Optimierung eines Dauermagnetkreises 325
- 3.2.5.3.2. Berechnungsbeispiel für einen Dauermagnetkreis 327
- 3.2.5.3.3. Remanente und permanente Magnete. Stabilisierung 328
- 3.2.5.4. Ersatzschaltungen für magnetische Kreise. Magnetische Netzwerke 334
- 3.3. Energie und Kräfte im stationären magnetischen Feld 336
  - 3.3.1. Die Energie im stationären magnetischen Feld 336
  - 3.3.1.1. Die magnetische Energie einer Stromschleife 337
  - 3.3.1.2. Die magnetische Energie zweier miteinander verketteter Stromschleifen 339
  - 3.3.1.3. Die Berechnung von Induktivitäten mit Hilfe der magnetischen Energie 341
    - 3.3.1.3.1. Die innere Induktivität eines unendlich langen, geraden Leiters 341
    - 3.3.1.3.2. Die Induktivität eines Koaxialkabels 342
  - 3.3.2. Kraft und Drehmoment im stationären Magnetfeld 344
  - 3.3.2.1. Kraft und Drehmoment auf Körper im leeren Raum 345
    - 3.3.2.1.1. Kraft und Drehmoment auf eine starre Leiterschleife 345
    - 3.3.2.1.2. Kraft und Drehmoment auf magnetisierte und von Leitungsströmen durchflossene Körper im leeren Raum nach der Elementarstromtheorie 349
    - 3.3.2.1.3. Kraft und Drehmoment auf magnetisierte und von Leitungsströmen durchflossene Körper im leeren Raum nach der Mengentheorie 355
    - 3.3.2.1.4. Übereinstimmung der Kräfte auf Körper im leeren Raum nach der Elementarstromtheorie und nach der Mengentheorie 359
    - 3.3.2.1.5. Die bewegte elektrische Ladung im homogenen Magnetfeld 359
    - 3.3.2.1.6. Das Zyklotron (Der Ionenbeschleuniger) 361
    - 3.3.2.1.7. Die Kraft auf einen Ankerstab einer elektrischen Maschine 362
    - 3.3.2.1.8. Die Kraft zwischen zwei parallelen, geraden, sehr langen Leitern. Die Ampere-Definition 363
  - 3.3.2.2. Kräfte auf Körper in magnetisierbaren Flüssigkeiten. Die ponderomotorische Kraft 364
  - 3.3.2.3. Das Prinzip der virtuellen Verschiebung. Die Kraft auf den Anker eines Hubmagneten 368

- 3.3.2.4. Darstellung der Kräfte mit Hilfe von Spannungstensoren. Vergleich der verschiedenen Spannungstensoren des elektrischen und des magnetischen Feldes 371
- 3.3.2.5. Drehmomente bei Körpern in magnetisierbaren Flüssigkeiten. Das ponderomotorische Drehmoment 373
- 3.4. Literatur 375

#### **4. Das nichtstationäre elektromagnetische Feld 377**

- 4.1. Die Wechselwirkungen zwischen elektrischem und magnetischem Feld 377
  - 4.1.1. Die I. Maxwellsche Gleichung. Verschiebungs- und Polarisationsstrom 377
  - 4.1.2. Die II. Maxwellsche Gleichung. Die Induktion in ruhenden Körpern 384
- 4.2. Der Begriff der Quasistationarität 388
- 4.3. Das quasistationäre elektromagnetische Feld 390
  - 4.3.1. Die Ruhinduktion in Leiterschleifen 390
    - 4.3.1.1. Die offene (stromlose, leerlaufende) Leiterschleife 390
    - 4.3.1.2. Die geschlossene (stromführende, belastete) Leiterschleife 397
    - 4.3.1.3. Die elektrische Leistung bei induzierten Leiterschleifen 400
    - 4.3.1.4. Die Kurzschlußschleife 402
  - 4.3.2. Die Bewegungsinduktion 405
  - 4.3.3. Die allgemeine Form des Induktionsgesetzes 407
  - 4.3.4. Das erweiterte Ohmsche Gesetz und die elektrische Leistung bei Zweipolen mit eingeprägten und induzierten elektromotorischen Kräften 411
  - 4.3.5. Konzentrierte Schaltelemente. Ideale Zweipole 412
  - 4.3.6. Die Beziehungen zwischen der Stromstärke und den Spannungsgrößen in idealen Zweipolen 414
    - 4.3.6.1. Der Ohmsche Widerstand 414
    - 4.3.6.2. Der Kondensator 415
    - 4.3.6.3. Die Spule 416
    - 4.3.6.4. Zusammenstellung der Beziehungen zwischen der Stromstärke und den Spannungsgrößen bei idealen Zweipolen 420
  - 4.3.7. Die elektrische Leistung eines idealen Zweipols 421
  - 4.3.8. Magnetisch gekoppelte Kreise 422
    - 4.3.8.1. Magnetisch gekoppelte Kreise ohne Streuung 428
    - 4.3.8.2. Magnetisch gekoppelte Kreise mit Streuung 429
  - 4.3.9. Serien- und Parallelschaltung von Spulen 433
    - 4.3.9.1. Spulen ohne Kopplung 433

- 4.3.9.1.1. Serienschaltung von Spulen ohne Kopplung 433
- 4.3.9.1.2. Parallelschaltung von Spulen ohne Kopplung 434
- 4.3.9.2. Spulen mit gegenseitiger Kopplung 435
- 4.3.9.2.1. Serienschaltung von Spulen mit Kopplung 435
- 4.3.9.2.2. Parallelschaltung von Spulen mit Kopplung 436
- 4.3.9.2.3. Bifilare Verlegung von Drähten 437
- 4.3.10. Die Berechnung quasistationärer Vorgänge in linearen elektrischen Netzwerken 438
  - 4.3.10.1. Die Kirchhoffschen Regeln 438
  - 4.3.10.2. Das Integro-Differentialgleichungssystem 440
  - 4.3.10.3. Die Integration einer linearen Differentialgleichung mit konstanten Koeffizienten 443
  - 4.3.10.4. Die Anfangsbedingungen 448
- 4.3.11. Die Berechnung einiger einfacher Stromkreise 449
  - 4.3.11.1. Serienschaltung Ohmwiderstand-Kondensator 449
    - 4.3.11.1.1. Anschalten einer Gleichspannung 450
    - 4.3.11.1.2. Der Energieumsatz beim Laden eines Kondensators 452
    - 4.3.11.1.3. Entladen eines Kondensators 453
    - 4.3.11.1.4. Anschalten einer nach einer e-Funktion abklingenden Spannung 454
    - 4.3.11.1.5. Anschalten einer sinusförmigen Wechselspannung 456
    - 4.3.11.1.6. Anschalten einer gedämpften sinusförmigen Wechselspannung 462
  - 4.3.11.2. Serienschaltung Ohmwiderstand-Spule 463
    - 4.3.11.2.1. Anschalten einer Gleichspannung 463
    - 4.3.11.2.2. Abschalten der Spule 465
    - 4.3.11.2.3. Anschalten einer Spannung vom Verlauf einer e-Funktion 466
  - 4.3.11.3. Serienschaltung Ohmwiderstand-Kondensator-Spule (Thomsonscher Schwingungskreis) 466
    - 4.3.11.3.1. Anschalten einer Gleichspannung 467
    - 4.3.11.3.2. Anschalten einer Spannung vom Verlauf einer e-Funktion 471
- 4.4. Das zeitlich rasch veränderliche elektromagnetische Feld 472
  - 4.4.1. Die Differentialgleichungen des elektromagnetischen Feldes 472
    - 4.4.1.1. Die Maxwellsche Theorie 472
    - 4.4.1.2. Die Lorentzsche Elektronentheorie, Übergang vom Mikrozum Makrobereich (Elementarstromtheorie) 475
    - 4.4.1.3. Die Feldgleichungen vom Standpunkt der magnetischen Mengentheorie 478
  - 4.4.2. Der Energiesatz der Elektrodynamik 480
    - 4.4.2.1. Die Energieverluste beim Umpolarisieren und Ummagnetisieren 489
  - 4.4.3. Die Wellengleichung für den leeren Raum und für den homogenen, isotropen Isolator 493

XVI Inhaltsverzeichnis

- 4.4.4. Das elektromagnetische Feld einer beliebigen Ladungs-, Strom- und Materialverteilung. Die elektrodynamischen Potentiale 496
- 4.4.5. Die Integration der Feldgleichungen 502
- 4.4.5.1. Die ebene Welle im homogenen isotropen Isolator 503
- 4.4.5.2. Der zeitlich veränderliche elektrische Dipol (Hertzscher Dipol) 506
- 4.5. Literatur 511

**Sachverzeichnis 512**