

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. Vermaschte 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 (Teilstrome) 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 Leiterstückes 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 Spinnmoment 279
 - 3.2.2.1.1. Das Bahnmoment 279
 - 3.2.2.1.2. Das Spinnmoment 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 Ampère-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 Spannungssensoren. Vergleich der verschiedenen Spannungssensoren 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 eingepprägten 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 Mikro- zum 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

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