

Inhaltsverzeichnis

1. Das elektrostatische Feld	25
1.1. Das elektrostatische Feld im Vakuum	25
1.1.1. Das Coulombsche Gesetz	25
1.1.1.1. Ladung	25
1.1.1.2. Kräfte zwischen Punktladungen im Vakuum	26
1.1.2. Das elektrische Feld und seine Beschreibung	27
1.1.2.1. Feldbegriff	27
1.1.2.2. Einführung der elektrischen Feldstärke	27
1.1.2.3. Feld der elektrischen Feldstärke	27
1.1.2.4. Überlagerung der Feldstärken mehrerer Punktladungen	28
1.1.2.5. Linienintegral der elektrischen Feldstärke	28
1.1.2.6. Potential und Potentialfeld	29
1.1.2.7. Beziehung zwischen Feldstärke und Potential	30
1.1.2.8. Überlagerung der Potentiale	32
1.1.2.9. Bildliche Darstellung des elektrischen Feldes	32
1.1.3. Einheiten	33
1.1.4. Feld zweier Punktladungen	34
1.1.4.1. Feld zweier gleichnamiger Punktladungen	34
1.1.4.2. Feld zweier ungleichnamiger Punktladungen	35
1.1.5. Das elektrische Moment	36
1.1.5.1. Moment eines neutralen Systems von Ladungen	36
1.1.5.2. Dipolmoment	37
1.1.5.3. Feld des Dipols	37
1.1.6. Verschiebung	39
1.1.6.1. Verschiebungsfluß und Verschiebungsflußdichte	39
1.1.6.2. Verschiebungslinien	41
1.2. Das elektrostatische Feld im stoffgefüllten Raum	41
1.2.1. Einteilung der Stoffe hinsichtlich ihres Verhaltens im elektrischen Feld	41
1.2.1.1. Leiter im elektrostatischen Feld	41
1.2.1.2. Das elektrostatische Feld in Nichtleitern – dielektrische Polarisierung	44
1.2.2. Mathematische Beschreibung des Feldes im Dielektrikum	45
1.2.2.1. Vektor der Polarisierung	45
1.2.2.2. Raumladungsdichte der gebundenen Ladungen	46
1.2.2.3. Fluß und Flußdichte im polarisierten Dielektrikum	48
1.2.2.4. Der Gaußsche Satz der Elektrostatik	49
1.2.2.5. Dielektrizitätskonstante und dielektrische Suszeptibilität	49
1.2.2.6. Einfluß des Stoffes auf das Feld einer Punktladung	49
1.2.2.7. Beeinflussung des Potentials durch Polarisierung	50
1.2.3. Beziehung zwischen Verschiebungsdichte und Feldstärke	51
1.2.3.1. Bestimmung der Dielektrizitätskonstanten	51
1.2.3.2. Dielektrizitätskonstanten technisch wichtiger Materialien	52
1.2.3.3. Stoffe mit nichtlinearer Beziehung zwischen D und E	52
1.2.3.4. Einteilung der Stoffe	54

1.2.4.	Feldverlauf an Grenzflächen zwischen zwei Stoffen mit verschiedenen Dielektrizitätskonstanten	54
1.3.	Die Differentialgleichungen des elektrostatischen Feldes	56
1.3.1.	Die Gleichungen von <i>Laplace</i> und <i>Poisson</i>	56
1.3.2.	Lösung der Feldgleichungen	57
1.3.2.1.	Der Greensche Satz	57
1.3.2.2.	Integration der Poissonschen Gleichung	58
1.3.2.3.	Eindeutigkeit der Lösung der Randwertaufgaben	60
1.4.	Die Integralparameter des elektrostatischen Feldes	61
1.4.1.	Kondensator	61
1.4.2.	Kapazität	61
1.4.3.	Schaltungen von Kondensatoren	62
1.4.3.1.	Parallelschaltung von Kondensatoren	62
1.4.3.2.	Reihenschaltung von Kondensatoren	63
1.4.3.3.	Spannungsvervielfachung mittels Kapazitäten	63
1.5.	Methoden zur Berechnung der elektrostatischen Felder von Elektroden einfacher geometrischer Formen	64
1.5.1.	Übersicht	64
1.5.2.	Methode der Spiegelbilder	64
1.5.2.1.	Spiegelung an einer Ebene, die zwei Dielektrika trennt	65
1.5.2.2.	Spiegelung an einer Ebene, die einen Nichtleiter von einem metallischen Leiter trennt	67
1.5.2.3.	Spiegelung an zwei sich schneidenden metallischen Ebenen	69
1.5.2.4.	Spiegelung an einer metallischen Kugeloberfläche	70
1.5.3.	Beispiele der Behandlung von Feldern durch Überlagerung, Spiegelung, Anwendung des Gaußschen Satzes und Belegung von Äquipotentialflächen mit Metallfolien	71
1.5.3.1.	Feld einer Kugelelektrode	71
1.5.3.2.	Der sphärische Kondensator	72
1.5.3.3.	Feld einer geladenen Kugelelektrode und einer Punktladung	73
1.5.3.4.	Feldbild zweier geladener Kugelelektroden	74
1.5.3.5.	Erdkapazität einer Kugelelektrode	75
1.5.3.6.	Feld der kurzen Linienladung	76
1.5.3.7.	Feld der sehr langen Linienladung	78
1.5.3.8.	Koaxialzylindrische Elektrodenanordnung	79
1.5.3.9.	Feld zwischen zwei sehr langen parallelen Linienladungen	81
1.5.3.10.	Feld zwischen zwei parallelen zylindrischen Elektroden mit gleichem Radius	84
1.5.3.11.	Feld zwischen zwei parallelen zylindrischen Elektroden mit ungleichen Radien	86
1.5.3.12.	Feld des Zylinderkondensators mit exzentrischen Elektroden	86
1.5.3.13.	Feld einer sehr langen zylindrischen Elektrode, die parallel zu einer ebenen Elektrode verläuft	87
1.5.3.14.	Kapazität der horizontalen Antenne	88
1.5.3.15.	Kapazität der vertikalen Antenne	90
1.5.3.16.	Ringförmige Linienladung	90
1.5.3.17.	Feld einer unendlich ausgedehnten Ebene mit konstanter Flächendichte ..	92
1.5.4.	Behandlung von Feldern durch Lösung der Feldgleichungen unter Berücksichtigung der Randbedingungen	93
1.5.4.1.	Das eindimensionale Feld	93
1.5.4.2.	Lösung der Poissonschen Gleichung für das zylindersymmetrische Feld ...	95
1.5.4.3.	Lösung der Poissonschen Gleichung für das kugelsymmetrische Feld	95

1.5.4.4.	Kegelelektroden	96
1.5.5.	Lösung der Laplaceschen Differentialgleichung durch Produktansatz	97
1.5.5.1.	Lösung der Laplaceschen Differentialgleichung für zweidimensionale Felder in kartesischen Koordinaten durch Produktansatz	97
1.5.5.2.	Lösung der Laplaceschen Gleichung für dreidimensionale Felder in kartesischen Koordinaten durch Produktansatz	100
1.5.5.3.	Lösung der Laplaceschen Gleichung für dreidimensionale Felder in sphärischen Koordinaten durch Produktansatz	101
1.5.5.4.	Lösung der Laplaceschen Gleichung für dreidimensionale Felder in zylindrischen Koordinaten durch Produktansatz	104
1.5.6.	Lösung der Laplaceschen Gleichung durch Reihenentwicklung	106
1.5.7.	Behandlung von Feldern durch konforme Abbildungen	107
1.5.7.1.	Darstellung ebener elektrostatischer Felder durch komplexe analytische Funktionen	107
1.5.7.2.	Konforme Abbildungen	109
1.5.7.3.	Feld einer sehr langen Linienladung	112
1.5.7.4.	Feld eines Liniendipols	113
1.5.7.5.	Feld zwischen langgestreckten parallelen Linienladungen entgegengesetzter Polarität	114
1.5.7.6.	Feld zwischen geladenen Kanten	116
1.5.7.7.	Feld einer einspringenden Ecke	117
1.5.7.8.	Feld am Rande eines sehr ausgedehnten Plattenkondensators	118
1.5.7.9.	Feld in einem tiefen Schlitz einer Elektrode ($\varphi = 0$)	118
1.5.7.10.	Feld in der Umgebung eines Röhrengitters	119
1.5.7.11.	Schwarz-Christoffelscher Abbildungssatz	121
1.5.8.	Grafische Konstruktion des Feldbilds	125
1.5.8.1.	Grafische Konstruktion im zweidimensionalen Feld	125
1.5.8.2.	Grafische Konstruktion im rotationssymmetrischen Feld	127
1.5.8.3.	Grafische Überlagerung von Feldbildern	128
1.6.	Numerische Verfahren zur Berechnung elektrostatischer Felder	129
1.6.1.	Differenzenverfahren	130
1.6.1.1.	Das zweidimensionale Feld	130
1.6.1.2.	Erfassung der Randbedingungen	132
1.6.1.3.	Aufstellung des Gleichungssystems	134
1.6.1.4.	Das dreidimensionale Feld	135
1.6.1.5.	Anwendung des Verfahrens bei Vorhandensein von Grenzflächen	137
1.6.1.6.	Durchführung der numerischen Berechnung	138
1.6.2.	Ermittlung der Feldstärke	140
1.6.3.	Ermittlung der Äquipotentiallinien bei gegebenen Potentialen in einem Koordinatengitter	141
1.6.4.	Numerische Ermittlung der Äquipotential- und Feldlinien bei analytisch gegebener Potentialfunktion	142
1.6.4.1.	Suchverfahren zum Auffinden von Punkten der Äquipotentiallinien	143
1.6.4.2.	Suchverfahren zur Bestimmung der Feldlinien	144
1.6.5.	Lösung der Dirichletschen Randwertaufgabe mit Hilfe der Monte-Carlo-Methode	144
1.6.6.	Netzwerkmodell der Differenzengleichung	148
1.6.7.	Variationsprobleme und Randwertaufgaben	151
1.6.7.1.	Herleitung eines äquivalenten Randwertproblems aus einem Variationsproblem	151
1.6.7.2.	Variationsproblem für die allgemeine Randwertaufgabe des elektrostatischen Feldes in beliebigen isotopen hysteresefreien Medien	153
1.6.7.3.	Näherungslösungen für Variationsprobleme. Das Verfahren von <i>Ritz</i>	155

1.6.8.	Methode der finiten Elemente	157
1.6.9.	Methode der Sekundärquellen	161
1.7.	Mehrleitersysteme	165
1.7.1.	Potentialkoeffizienten	165
1.7.2.	Kapazitätskoeffizienten	167
1.7.3.	Teilkapazitäten	168
1.7.3.1.	Teilkapazitäten der Doppelleitung	169
1.7.3.2.	Teilkapazitäten beim Dreileiterkabel	173
1.7.4.	Methode der mittleren Potentiale bei Leitern endlicher Länge	175
1.8.	Energie und Kräfte im elektrostatischen Feld	176
1.8.1.	Energie eines Systems von Ladungen	176
1.8.2.	Feldenergie	178
1.8.3.	Energie eines geladenen Kondensators	179
1.8.3.1.	Energie eines Zweielektrodensystems	179
1.8.3.2.	Prinzip der Influenzmaschine	180
1.8.4.	Kräfte im Zweielektrodensystem	180
1.8.4.1.	Flächendruck	180
1.8.4.2.	Gesamtkraft auf die Elektroden eines Kondensators	180
1.8.5.	Kräfte in Dielektrika und an Grenzflächen	182
1.8.5.1.	Längs- und Querspannungen	182
1.8.5.2.	Kraft an der Grenzfläche zweier Dielektrika	183
2.	Das stationäre elektrische Strömungsfeld	186
2.1.	Grundbegriffe	186
2.1.1.	Wesen des stationären elektrischen Strömungsfelds	186
2.1.2.	Kenngrößen des stationären elektrischen Strömungsfelds	188
2.1.2.1.	Stromstärke	188
2.1.2.2.	Stromdichte	188
2.1.2.3.	Stromrichtung	190
2.2.	Grundgesetze des stationären elektrischen Strömungsfeldes	190
2.2.1.	Das Ohmsche Gesetz	190
2.2.2.	Gesetz von <i>Joule</i>	191
2.2.3.	Die Kirchhoffschen Sätze	192
2.2.3.1.	Der Erste Kirchhoffsche Satz	192
2.2.3.2.	Der Zweite Kirchhoffsche Satz oder das verallgemeinerte Ohmsche Gesetz	192
2.2.4.	Bildliche Darstellung des elektrischen Strömungsfeldes	193
2.2.5.	Stromdurchgang durch Grenzflächen von Stoffen mit verschiedener Leitfähigkeit	193
2.2.6.	Integralparameter des elektrischen Strömungsfeldes	194
2.2.6.1.	Das Ohmsche Gesetz in Integralform	194
2.2.6.2.	Beziehungen zwischen den Integralparametern des elektrischen Feldes	195
2.3.	Berechnung elektrischer Strömungsfelder	196
2.3.1.	Allgemeines	196
2.3.2.	Beispiele	197
2.3.2.1.	Kugelsymmetrische Strömungsfelder	197
2.3.2.2.	Strömungsfeld zweier Punktquellen, die gleiche Ströme entgegengesetzten Vorzeichens führen	200
2.3.2.3.	Strömungsfeld zweier Punktquellen, die gleiche Ströme gleichen Vorzeichens führen	201
2.3.2.4.	Strömungsfeld einer Linienquelle	203

2.3.2.5.	Leitender Zylinder im homogenen Strömungsfeld	204
2.3.2.6.	Numerische Lösung der Differentialgleichung mit dem Differenzenverfahren	207
2.4.	Das unvollkommene Dielektrikum	208
2.4.1.	Vorgänge an der Grenzfläche zweier unvollkommener Dielektrika	208
2.4.2.	Umladungsvorgänge bei unvollkommenen inhomogenen Dielektrika	209
2.5.	Eigenschaften technischer Leitermaterialien	211
2.5.1.	Leiterwerkstoffe	211
2.5.2.	Metallische Widerstandswerkstoffe	212
2.5.3.	Temperaturabhängigkeit des spezifischen Widerstands	214
2.6.	Der elektrische Strom in unverzweigten linearen Stromkreisen	214
2.6.1.	Der stationäre Strom in linienhaften Leitern	214
2.6.1.1.	Der linienhafte Leiter. Der geschlossene Stromkreis	214
2.6.1.2.	Festlegung der positiven Richtung von Strom, Spannung und EMK	215
2.6.1.3.	Leistungsbilanz in einem Stromkreisabschnitt	216
2.6.1.4.	Widerstand linienhafter Leiter und seine Temperaturabhängigkeit	216
2.6.1.5.	Erwärmung stromdurchflossener Leiter	217
2.6.2.	Die Elemente des unverzweigten Grundstromkreises	218
2.6.2.1.	Verbraucher	218
2.6.2.2.	Spannungsquelle	220
2.6.3.	Der unverzweigte Grundstromkreis	222
2.6.3.1.	Spannungsquelle und Belastungswiderstand	222
2.6.3.2.	Potentialverteilung längs eines einfachen Stromkreises mit mehreren EMKs und mehreren Widerständen	224
2.7.	Das verzweigte lineare elektrische Netzwerk	225
2.7.1.	Grundgesetze	225
2.7.1.1.	Knotenpunkt und Zweig	225
2.7.1.2.	Das Ohmsche Gesetz in einem Stromzweig	226
2.7.1.3.	Leistungsbilanz in einem Zweig	226
2.7.1.4.	Die Kirchhoffschen Sätze für Netzwerke	227
2.7.1.5.	Reihen- und Parallelschaltung von Widerständen	230
2.7.2.	Hilfssätze zur Berechnung von linearen verzweigten Netzen	231
2.7.2.1.	Methode der Knotenpotentiale	231
2.7.2.2.	Methode der Maschenströme	232
2.7.2.3.	Superpositionsprinzip (<i>Helmholtz</i> , 1853)	234
2.7.2.4.	Austauschprinzip (<i>Maxwell</i> , 1831–1879)	235
2.7.2.5.	Satz von der Ersatzquelle	236
2.7.2.6.	Satz von der Kompensation	237
2.7.3.	Umwandlung elektrischer Netze	238
2.7.3.1.	Gegenseitige Umwandlung von Strom- und Spannungsquellen	238
2.7.3.2.	Netzwerke mit zwei Knotenpunkten	240
2.7.3.3.	Stern-Polygon-Umwandlung	241
2.7.4.	Duale Beziehungen	241
2.8.	Schaltungen zum Vergleich und zur Kompensation elektrischer Größen	245
2.8.1.	Brückenschaltung	245
2.8.1.1.	Unabhängigkeit der Diagonalzweige	245
2.8.1.2.	Whearstonesche Brücke	246
2.8.1.3.	Verstimmte Brücke	247
2.8.2.	Spannungskompensation	248
2.8.2.1.	Kompensationsmethode zur Widerstandsmessung	249
2.8.2.2.	Thomsonsche Brücke	249

2.9. Behandlung von Verteilungsnetzen	250
2.10. Stromkreise mit nichtlinearen Elementen	255
2.10.1. Grafische Behandlung von Stromkreisen mit nichtlinearen Elementen	255
2.10.1.1. Reihenschaltung von nichtlinearen Elementen	255
2.10.1.2. Parallelschaltung von nichtlinearen Elementen	256
2.10.1.3. Reihen-Parallel-Schaltung dreier Elemente mit beliebigen Strom-Spannungs- Kennlinien	257
2.10.2. Beispiel einer analytischen Behandlung eines nichtlinearen Netzes	258
3. Das magnetische Feld	260
3.1. Grundlagen	260
3.1.1. Ausbildung des magnetischen Feldes und Kraftwirkung im magnetischen Feld	260
3.1.1.1. Die magnetischen Feldlinien	260
3.1.1.2. Kraftwirkung auf bewegte elektrische Ladungen im magnetischen Feld. Induktion (Magnetflußdichte)	261
3.1.1.3. Die Bahn bewegter Ladungen im magnetischen Feld	262
3.1.2. Fluß der magnetischen Induktion	264
3.1.2.1. Quellenfreiheit des magnetischen Induktionsflusses	265
3.1.2.2. Der verkettete Fluß	266
3.1.3. Kraftwirkung auf stromdurchflossene Leiter im magnetischen Feld	266
3.1.4. Elektromagnetische Induktion	268
3.1.5. Beispiele für die Anwendung der Grundgesetze	272
3.1.5.1. Drehspulinstrument	272
3.1.5.2. Wirbelstrombremse	273
3.1.5.3. Unipolarmaschine	274
3.1.5.4. Messung der magnetischen Flußdichte	274
3.1.5.5. Messung des Linienintegrals der magnetischen Induktion	275
3.2. Gleichungen des magnetischen Feldes	277
3.2.1. Magnetische Feldstärke und das Durchflutungsgesetz	277
3.2.2. Das magnetische Feld in stromfreien Gebieten. Potential des magnetischen Feldes	279
3.2.3. Das magnetische Feld in stromführenden Gebieten. Vektorpotential	280
3.2.3.1. Einführung des Vektorpotentials	280
3.2.3.2. Beziehung zwischen Vektorpotential und magnetischem Fluß	282
3.2.4. Das skalare Potential des geschlossenen Stromkreises	282
3.2.5. Gesetz von <i>Biot-Savart</i>	285
3.2.5.1. Zusammenhang zwischen magnetischer Feldstärke und räumlicher Strom- dichteverteilung	285
3.2.5.2. Das magnetische Feld in der Umgebung eines Linienstromes	285
3.2.5.3. Das magnetische Moment des elementaren Ringstromes	287
3.3. Materie im magnetischen Feld	290
3.3.1. Einfluß der Materie im magnetischen Feld	290
3.3.1.1. Elementarströme	290
3.3.1.2. Magnetisierung, Permeabilität und Suszeptibilität	291
3.3.1.3. Bestimmung der Permeabilität	294
3.3.2. Klassifizierung der Stoffe	295
3.3.2.1. Allgemeines	295
3.3.2.2. Diamagnetische Stoffe	296
3.3.2.3. Paramagnetische Stoffe	296
3.3.2.4. Ferromagnetische Stoffe	297
3.3.3. Eigenschaften ferromagnetischer Werkstoffe	308

3.3.3.1. Weichmagnetische Werkstoffe	308
3.3.3.2. Hartmagnetische Werkstoffe	310
3.3.3.3. Antiferromagnetische Stoffe (Ferrite)	312
3.4. Verhalten des magnetischen Flusses an der Grenzfläche zweier Stoffe mit verschiedenen Permeabilitäten	313
3.5. Der magnetische Kreis	314
3.5.1. Berechnung magnetischer Kreise	314
3.5.1.1. Nutzfluß und Streufluß	314
3.5.1.2. Berechnungsgrundlagen	315
3.5.1.3. Das Hopkinsonsche Gesetz. Der magnetische Widerstand	316
3.5.1.4. Kernfeldstärke und Kernpermeabilität	317
3.5.1.5. Wirkung des Luftspalts auf die Magnetisierungskennlinie	318
3.5.1.6. Analogien zum elektrischen Stromkreis	319
3.5.2. Verzweigte magnetische Kreise	320
3.5.2.1. Bestimmung der Durchflutung bei gegebenem Fluß	320
3.5.2.2. Bestimmung der Flüsse bei gegebener Durchflutung	321
3.5.3. Dauermagnetkreise	324
3.5.3.1. Näherungsweise Berechnung	324
3.5.3.2. Wirksamkeit eines Dauermagnetmaterials	326
3.5.3.3. Berücksichtigung der weichmagnetischen Abschnitte des Kreises	328
3.6. Berechnung magnetischer Felder	329
3.6.1. Allgemeines	329
3.6.2. Beispiele der Berechnung magnetischer Felder	329
3.6.2.1. Das magnetische Feld eines unendlich langen geraden stromdurchflossenen Leiters	329
3.6.2.2. Feld mehrerer paralleler stromdurchflossener Leiter	332
3.6.2.3. Feld zweier paralleler stromdurchflossener Leiter	334
3.6.2.4. Teilfeld eines geradlinigen Leiterabschnitts	335
3.6.2.5. Das magnetische Feld eines räumlichen Strömungsfelds	336
3.6.2.6. Magnetische Feldstärke in der Ebene eines linienhaften Ringstroms	338
3.6.2.7. Feld im Inneren einer zylindrischen Spule	339
3.6.2.8. Das magnetische Feld in einem zylindrischen, exzentrisch hohlen Leiter ..	341
3.6.3. Methode der Spiegelbilder. Das magnetische Feld eines Stromes, der parallel zu einer Grenzfläche verläuft	344
3.6.4. Grafische Superposition von Feldbildern	345
3.6.4.1. Konstruktion der Äquipotentiallinien	345
3.6.4.2. Überlagerung der Feldstärken	346
3.6.5. Produktansatz zur Behandlung magnetischer Felder. Magnetische Abschirmung	347
3.7. Numerische Verfahren zur Berechnung magnetischer Felder	351
3.7.1. Methode der finiten Elemente	351
3.7.2. Anwendung der Methode der Sekundärquellen zur Berechnung stationärer magnetischer Felder	352
3.8. Integralparameter des magnetischen Feldes	356
3.8.1. Induktivität	356
3.8.1.1. Berechnung der Induktivität	356
3.8.1.2. Einfache Beispiele für die Ermittlung der Induktivität	358
3.8.2. Gegeninduktivität	361
3.8.2.1. Berechnung der Gegeninduktivität	361
3.8.2.2. Beispiele zur Berechnung von Gegeninduktivitäten	362

3.9. Selbstinduktion und Gegeninduktion	366
3.9.1. Selbstinduktion	366
3.9.2. Gegeninduktion	366
3.9.3. Streufaktor und Kopplungsgrad	367
3.10. Energie und Kräfte im magnetischen Feld	369
3.10.1. Energie im magnetischen Feld	369
3.10.1.1. Magnetische Energie des Einzelstromkreises	369
3.10.1.2. Magnetische Energie in dem Feld zweier induktiv gekoppelter Stromkreise	370
3.10.1.3. Energie mehrerer gekoppelter Stromkreise	370
3.10.1.4. Energie des magnetischen Feldes und die Feldgrößen	371
3.10.1.5. Bestimmung der Induktivität aus der Energie des magnetischen Feldes ...	372
3.10.1.6. Energie magnetischer Felder in ferromagnetischen Stoffen	373
3.10.2. Kräfte im magnetischen Feld	374
3.10.2.1. Kraftwirkungen zwischen stromdurchflossenen Leitern	374
3.10.2.2. Kraftwirkung zwischen zwei parallelen langen Leitern	375
3.10.2.3. Ermittlung der mechanischen Kräfte aus energetischen Betrachtungen ...	375
4. Das elektromagnetische Feld	379
4.1. Grundgleichungen des elektromagnetischen Feldes	379
4.1.1. System der Maxwell'schen Gleichungen	379
4.1.1.1. Satz von der Erhaltung der Elektrizitätsmenge	379
4.1.1.2. Der verallgemeinerte Strombegriff	379
4.1.1.3. Die Maxwell'schen Gleichungen	381
4.1.1.4. Satz von der Erhaltung der Elektrizitätsmenge und die Erste Maxwell'sche Gleichung	382
4.1.1.5. Quellenfreiheit des magnetischen Induktionsflusses und die Zweite Maxwell'sche Gleichung	382
4.1.2. Gliederung der elektromagnetischen Felder	383
4.1.3. Energie im elektromagnetischen Feld. Energiegleichung	385
4.2. Lösung der Maxwell'schen Gleichungen	388
4.2.1. Wellengleichungen für die Feldstärken	388
4.2.1.1. Auflösung der Maxwell'schen Differentialgleichungen nach der elektrischen Feldstärke	388
4.2.1.2. Auflösung der Maxwell'schen Differentialgleichungen nach der magnetischen Feldstärke	389
4.2.2. Allgemeine Lösung der eindimensionalen Wellengleichung	390
4.2.3. Wellengleichungen für die elektrodynamischen Potentiale	391
4.2.3.1. Beziehung zwischen dem skalaren elektrischen Potential und dem Vektorpotential	391
4.2.3.2. Die d'Alembert'schen Gleichungen für das Vektorpotential und das skalare Potential	393
4.2.4. Allgemeine Lösung der Wellengleichung für die Potentiale	394
4.2.5. Das elektrische Polarisationspotential. Der Hertz'sche Vektor	396
4.2.5.1. Wellengleichung für den Hertz'schen Vektor	396
4.2.5.2. Berechnung der elektrischen und magnetischen Feldstärke aus dem Polarisationsvektor	396
5. Mechanismus der Stromleitung	398
5.1. Grundbegriffe	398
5.2. Mechanismus der Stromleitung in Festkörpern	400
5.2.1. Grundlagen der Stromleitung in Festkörpern	400
5.2.1.1. Energieniveaus der Elektronen (Termschema)	400

5.2.1.2.	Anregung und Ionisation	404
5.2.1.3.	Der feste Körper. Bändermodell	404
5.2.1.4.	Einteilung der Körper in Leiter, Halbleiter und Nichtleiter	407
5.2.2.	Stromleitung durch Metalle	409
5.2.2.1.	Klassische Theorie der Stromleitung	409
5.2.2.2.	Einfluß der Temperatur und der Beimengungen	412
5.2.2.3.	Das Joulesche Gesetz	413
5.2.3.	Stromdurchgang durch Nichtleiter (Dielektrika)	414
5.2.3.1.	Physikalische Vorgänge der Stromleitung in Dielektrika	414
5.2.3.2.	Durchschlag fester Isolierstoffe	415
5.2.3.3.	Durchschlag flüssiger Isolierstoffe	416
5.2.4.	Halbleiter	417
5.2.4.1.	Eigenleitfähigkeit	417
5.2.4.2.	Einbau von Fremdatomen. Donatoren und Akzeptoren	417
5.2.4.3.	<i>pn</i> -Übergang	419
5.3.	Austritt von Elektronen aus Metallen	423
5.3.1.	Austrittsarbeit	423
5.3.1.1.	Aktiviert Katoden	425
5.3.1.2.	Das Schottkysche Napfmodell	425
5.3.2.	Glühemission. Emissionsstromdichte	426
5.3.3.	Senkung des Napfrands. Schottky-Effekt	427
5.3.4.	Feldemission. Kalte Emission. Tunneleffekt	427
5.3.5.	Photoemission	428
5.3.6.	Elektronenemission durch aufprallende Korpuskeln. Sekundärelektronen-emission	428
5.4.	Stromleitung durch elektrolytische Flüssigkeiten	429
5.4.1.	Stromleitung durch schwache Elektrolyte	429
5.4.2.	Stromleitung durch starke Elektrolyte	431
5.5.	Stromleitung durch Gase	432
5.5.1.	Unselbständige Entladung	432
5.5.1.1.	Anfangsbereich	433
5.5.1.2.	Elektronenlawine. Townsend-Entladung	436
5.5.1.3.	Trägervermehrung durch Aufprall positiver Teilchen auf die Katode	437
5.5.1.4.	Ionisierungszahl und Stoßfunktion	438
5.5.1.5.	Gesetz von <i>Paschen</i>	440
5.5.2.	Selbständige Entladung	441
5.5.2.1.	Glimmentladung	442
5.5.2.2.	Bogenentladung	447
5.5.2.3.	Besondere Formen der Entladung	451
5.6.	Stromleitung im Vakuum	453
5.6.1.	Physikalische Grundlagen der Stromleitung im Vakuum	453
5.6.1.1.	Allgemeines	453
5.6.1.2.	Verteilung der Temperaturgeschwindigkeiten der Elektronen im Vakuum	453
5.6.2.	Hochvakuumdiode	455
5.6.2.1.	Potentialverteilung bei ebenen parallelen Elektroden	455
5.6.2.2.	Anlaufstromgesetz	456
5.6.2.3.	Raumladungsgesetz	458
5.6.2.4.	Kennlinie der Diode	462
5.6.2.5.	Kenngrößen der Diode	464
5.6.2.6.	Anodenverlustleistung	464

6. Wechselstromtechnik	466
6.1. Wechselgrößen	466
6.1.1. Periodische Wechselgrößen	466
6.1.2. Spezielle Wechselgrößen	467
6.1.2.1. Beurteilung der Wechselgrößen	467
6.1.2.2. Arithmetischer Mittelwert	467
6.1.2.3. Geometrischer Mittelwert oder Effektivwert	467
6.1.3. Sinusförmige Wechselgrößen	468
6.1.3.1. Arithmetischer Wechselwert und Effektivwert einer sinusförmigen Wechselgröße	468
6.1.3.2. Beziehungen zwischen zwei sinusförmigen Wechselgrößen	468
6.1.4. Darstellung sinusförmiger Wechselgrößen mittels Zeiger und komplexer Funktionen	469
6.1.4.1. Zeigerdiagramm	469
6.1.4.2. Darstellung sinusförmiger Wechselgrößen durch komplexe Zeitfunktionen	470
6.1.5. Darstellung sinusförmiger veränderlicher Vektoren durch komplexe Größen	471
6.2. Berechnung von Wechselstromnetzwerken	472
6.2.1. Grundlagen	472
6.2.1.1. Arithmetischer Mittelwert und Effektivwert des Wechselstroms	472
6.2.1.2. Erzeugung sinusförmiger elektromotorischer Kräfte	473
6.2.1.3. Der sinusförmige Wechselstrom in Widerständen	474
6.2.1.4. Der sinusförmige Wechselstrom in Kondensatoren	475
6.2.1.5. Der sinusförmige Wechselstrom durch Induktivitäten	476
6.2.1.6. Das Ohmsche Gesetz in komplexer Darstellung	478
6.2.1.7. Der komplexe Leitwert	479
6.2.2. Grundgesetze verzweigter Wechselstromnetzwerke	481
6.2.2.1. Der Erste Kirchhoffsche Satz in komplexer Form	481
6.2.2.2. Der Zweite Kirchhoffsche Satz in komplexer Form	482
6.2.3. Allgemeines über die Berechnung von Wechselstromnetzen	482
6.2.4. Grafische Methoden zur Behandlung von Wechselstromnetzwerken	483
6.2.4.1. Das topologische Zeigerdiagramm	483
6.2.4.2. Weitere grafische Methoden zur Behandlung von Wechselstromnetzwerken	484
6.2.5. Einfache Beispiele zur Behandlung von Wechselstromschaltungen	486
6.2.5.1. Reihenschaltung von Widerständen, Induktivitäten und Kapazitäten	486
6.2.5.2. Parallelschaltung von Widerständen, Induktivitäten und Kapazitäten	487
6.2.5.3. Allgemeine Reihenschaltung	489
6.2.5.4. Allgemeine Parallelschaltung	490
6.2.5.5. Der passive Zweipol	491
6.2.6. Behandlung von Netzwerken mit induktiver Kopplung zwischen einzelnen Netzzeigen	491
6.2.6.1. Kennzeichnung der Spulenanschlüsse	491
6.2.6.2. Reihenschaltung zweier Spulen mit induktiver Kopplung	492
6.2.6.3. Parallelschaltung zweier Spulen mit induktiver Kopplung	494
6.2.6.4. Behandlung von Netzwerken mit Gegeninduktivitäten zwischen den Zweigen	495
6.2.7. Leistung in Wechselstromkreisen	496
6.2.7.1. Scheinleistung, Wirkleistung, Blindleistung	648
6.2.7.2. Komplexe Leistung	499
6.3. Resonanz	499
6.3.1. Reihenresonanz oder Spannungsresonanz	500
6.3.1.1. Resonanzfrequenz	500
6.3.1.2. Gütefaktor des Kreises	501
6.3.1.3. Energieverhältnisse im Kreis	501

6.3.1.4.	Frequenzabhängigkeit der Blindwiderstände	502
6.3.1.5.	Resonanzkurven	502
6.3.1.6.	Bestimmung des Gütefaktors aus dem Verlauf der Resonanzkurve	505
6.3.2.	Parallelresonanz oder Stromresonanz	506
6.3.2.1.	Resonanzfrequenz	506
6.3.2.2.	Frequenzgang der Blindleitwerte	509
6.3.2.3.	Resonanzkurve	509
6.3.2.4.	Die energetischen Verhältnisse	510
6.4.	Ortskurven	511
6.4.1.	Die Gerade	512
6.4.1.1.	Gerade in allgemeiner Lage	512
6.4.1.2.	Gerade durch den Nullpunkt	512
6.4.1.3.	Parallelen zu den Achsen	513
6.4.1.4.	Rolle des Parameters	513
6.4.1.5.	Beispiele einer Geraden als Ortskurve	514
6.4.2.	Der Kreis	516
6.4.2.1.	Kreis durch den Nullpunkt	516
6.4.2.2.	Beispiel eines Kreises durch den Ursprung als Ortskurve	518
6.4.2.3.	Kreis in allgemeiner Lage	519
6.4.2.4.	Polarform der Kreisgleichung	521
6.4.3.	Die Parabel	522
6.5.	Einige spezielle Schaltungen der Wechselstromtechnik	524
6.5.1.	Schaltungen für eine Phasenverschiebung von $\pi/2$ zwischen Spannung und Strom	524
6.5.1.1.	Hummel-Schaltung	524
6.5.1.2.	Eine Brückenschaltung zur Erzeugung eines Phasenunterschiedes von $\pi/2$..	525
6.5.2.	Schaltungen zur automatischen Konstanthaltung des Stromes (Boucherot-Schaltung)	526
6.5.2.1.	Spannungsteilerschaltung	526
6.5.2.2.	Eine Brückenschaltung zur Konstanthaltung des Stromes	528
6.5.3.	Wechselstrombrücken	528
6.5.3.1.	Bedingung für die Unabhängigkeit der Diagonalzweige	528
6.5.3.2.	Wechselstrom-Meßbrückenschaltungen	530
6.5.4.	Ersatzschaltbilder des verlustbehafteten Kondensators	536
6.5.4.1.	Verlustwinkel	536
6.5.4.2.	Ersatzschaltbilder	536
6.5.4.3.	Beziehungen zwischen komplexem Widerstand, komplexem Leitwert und Verlustwinkel	537
6.6.	Mehrphasensysteme	538
6.6.1.	Grundbegriffe	538
6.6.1.1.	Entstehung von Mehrphasensystemen	538
6.6.1.2.	Balancierte und unbalancierte Mehrphasensysteme	541
6.6.1.3.	Stern- und Polygonschaltung verketteter Mehrphasensysteme	543
6.6.2.	Das verkettete Zweiphasensystem	546
6.6.3.	Das verkettete Dreiphasensystem	546
6.6.3.1.	Das symmetrische Dreiphasensystem	547
6.6.3.2.	Das unsymmetrische Dreiphasensystem	549
6.6.4.	Methode der symmetrischen Komponenten	552
6.6.4.1.	Einführung der symmetrischen Komponenten	552
6.6.4.2.	Grafische Ermittlung der symmetrischen Komponenten	554
6.6.4.3.	Grafische Zusammensetzung der symmetrischen Komponenten	554
6.6.4.4.	Besondere Fälle grafischer Konstruktionen	554

6.6.4.5.	Ein Beispiel für die Anwendung der symmetrischen Komponenten	556
6.6.5.	Umwandlung der Phasenzahl bei Mehrphasensystemen	557
6.6.6.	Messung der Leistung im Dreiphasensystem	559
6.6.6.1.	Allgemeines	559
6.6.6.2.	Aron-Schaltung	560
6.6.6.3.	Messung der Blindleistung	561
6.6.7.	Das Drehfeld	562
6.6.7.1.	Entstehung eines magnetischen Drehfelds	562
6.6.7.2.	Prinzipien des Asynchron- und des Synchronmotors	564
6.7.	Nichtsinusförmige periodische Wechselgrößen	565
6.7.1.	Darstellung nichtsinusförmiger periodischer Wechselgrößen durch Fouriersche Reihen	565
6.7.1.1.	Ermittlung der Fourier-Koeffizienten	565
6.7.1.2.	Amplituden- und Phasenspektrum	567
6.7.1.3.	Symmetrie bezüglich der Abszisse	568
6.7.1.4.	Symmetrie bezüglich der Ordinate	569
6.7.1.5.	Symmetrie bezüglich des Koordinatenursprungs	569
6.7.1.6.	Verschiebung des Koordinatenursprungs	570
6.7.2.	Effektivwert und Leistung bei nichtsinusförmigen periodischen Wechselgrößen	571
6.7.2.1.	Effektivwert einer nichtsinusförmigen periodischen Wechselgröße	571
6.7.2.2.	Leistung bei nichtsinusförmigen periodischen Strömen und Spannungen ..	572
6.7.2.3.	Leistungsfaktor	573
6.7.3.	Beurteilung der Abweichung vom sinusförmigen Verlauf	573
6.7.4.	Komplexe Form der Fourier-Reihe und Zusammenhang mit den Fourier-Integralen	574
6.7.4.1.	Komplexe Form der Fourier-Reihe	574
6.7.4.2.	Spektralfunktion	575
6.7.4.3.	Spektrale Darstellung der periodischen Impulsfolge	576
6.7.4.4.	Spektrum aperiodischer Funktionen	577
6.7.4.5.	Frequenzspektrum des einzelnen Rechteckimpulses	578
6.7.5.	Schwebung	579
6.7.6.	Modulation	582
6.7.6.1.	Amplitudenmodulation	582
6.7.6.2.	Frequenzmodulation	583
6.7.6.3.	Phasenmodulation	585
6.7.7.	Berechnung elektrischer Netze mit konstanten Parametern, in denen nichtsinusförmige periodische EMKs wirken	585
6.8.	Strom- und Flußverdrängung	586
6.8.1.	Stromverteilung in einem zylindrischen Leiter	586
6.8.1.1.	Grundlagen	586
6.8.1.2.	Widerstand eines zylindrischen Leiters bei hohen Frequenzen	590
6.8.1.3.	Eindringtiefe	592
6.8.2.	Stromverteilung über den Querschnitt eines dünnen Bleches	592
6.8.3.	Verteilung des Wechselflusses und der Wirbelströme über den Querschnitt eines dünnen magnetischen Kernblechs	595
6.8.4.	Wirbelstromverluste	597
6.8.5.	Stromverdrängung in Leitern, die in Nuten eingebettet sind	599
6.9.	Spule mit Eisenkern	602
6.9.1.	Hysteresisverluste	602
6.9.2.	Zeigerdiagramm und Ersatzschaltbild der Spule mit Eisenkern	604

6.9.3. Reihenschaltung und Parallelschaltung einer Spule mit Eisenkern und eines Kondensators	606
6.9.3.1. Reihenschaltung	607
6.9.3.2. Parallelschaltung	608
6.10. Transformator	609
6.10.1. Grundlagen	609
6.10.2. Zeigerdiagramme und Ersatzschaltbilder	611
6.10.2.1. Zeigerdiagramm der Ströme	611
6.10.2.2. Das vollständige Zeigerdiagramm des Transformators	611
6.10.2.3. Ersatzschaltbild des Transformators	613
6.10.3. Grenzfälle der Belastung, Wirkungsgrad und besondere Schaltungen des Transformators	615
6.10.3.1. Leerlauf	615
6.10.3.2. Kurzschluß	615
6.10.3.3. Wirkungsgrad	616
6.10.3.4. Spartransformator	617
6.10.3.5. Parallelbetrieb von Transformatoren	618
6.10.4. Dreiphasentransformator	620
6.10.4.1. Schaltung der Wicklungen beim Dreiphasentransformator	621
6.10.4.2. Parallelbetrieb von Dreiphasentransformatoren	624
6.10.5. Spezielle Schaltungen mit Transformatoren	624
6.10.5.1. Umwandlung der Phasenzahl mittels Transformatoren	624
6.10.5.2. Filter für symmetrische Komponenten	627
6.11. Theorie der Vierpole	629
6.11.1. Grundlagen	629
6.11.2. Vierpolgleichungen	631
6.11.2.1. Leitwertform der Vierpolgleichungen	631
6.11.2.2. Kettenform der Vierpolgleichungen	632
6.11.2.3. Widerstandsform der Vierpolgleichungen	633
6.11.2.4. Hybridform der Vierpolgleichungen	634
6.11.3. Ersatzschaltbilder für Vierpole	637
6.11.3.1. T-Schaltung	637
6.11.3.2. II-Schaltung	638
6.11.3.3. Unvollkommene Vierpole	638
6.11.4. Umkehrungssatz	640
6.11.5. Spezielle Belastungsfälle des Vierpols	640
6.11.5.1. Leerlauf und Kurzschluß	640
6.11.5.2. Bestimmung der Parameter der Ersatzschaltbilder aus der Leerlauf- und Kurzschlußmessung	641
6.11.5.3. Eingangswiderstand und Wellenwiderstand des symmetrischen Vierpols	642
6.11.6. Anwendung der Matrizenrechnung bei der Behandlung von Vierpolaufgaben	644
6.11.6.1. Kettenmatrix	644
6.11.6.2. Widerstandsmatrix	644
6.11.6.3. Leitwertmatrix	645
6.11.6.4. Matrix der ersten Hybridform	645
6.11.6.5. Matrix der zweiten Hybridform	645
6.11.6.6. Matrizen der einfachen Vierpole	646
6.11.6.7. Matrizen der unvollkommenen Vierpole	646
6.11.7. Berechnung komplizierter Vierpole	647
6.11.7.1. Kettenschaltung von Vierpolen	647
6.11.7.2. Parallelschaltung von Vierpolen	649
6.11.7.3. Reihenschaltung von Vierpolen	651

6.11.7.4. Parallel-Reihen-Schaltung von Vierpolen	652
6.11.7.5. Reihen-Parallel-Schaltung von Vierpolen	653
6.11.8. Vierpolketten	655
6.11.9. Phasendrehende Vierpole	658
6.12. Elektrische Filter	660
6.12.1. Grundlagen	660
6.12.1.1. Eigenschaften elektrischer Filter	660
6.12.1.2. Elementarvierpole der Kette	661
6.12.2. Ermittlung des Durchlaßbereichs	662
6.12.2.1. Ermittlung der Durchlaßbedingungen aus der A_{11} -Konstanten	662
6.12.2.2. Ermittlung des Durchlaßbereichs aus den Vierpolwiderständen	663
6.12.2.3. Ermittlung des Durchlaßbereichs aus dem Wellenwiderstand des Filters	663
6.12.3. Spezielle Filterschaltungen	664
6.12.3.1. Tiefpaß	664
6.12.3.2. Hochpaß	666
6.12.3.3. Bandpaß	667
6.12.3.4. Wirkung der Verluste	667
6.12.3.5. Ketten mit Elementen gleicher Art	668
6.13. Theorie der Leitungen	669
6.13.1. Grundlagen	669
6.13.1.1. Homogene Leitung	669
6.13.1.2. Gleichung der homogenen Leitung	670
6.13.1.3. Leitungsgleichungen bei sinusförmiger Spannung und sinusförmigem Strom	670
6.13.1.4. Wellenwiderstand, Fortpflanzungskonstante, Dämpfungskonstante und Phasenkonstante	673
6.13.1.5. Komponenten der Spannung und des Stromes	676
6.13.1.6. Reflexion	680
6.13.2. Betrieb der Leitungen	680
6.13.2.1. Die mit dem Wellenwiderstand abgeschlossene Leitung	680
6.13.2.2. Leerlauf- und Kurzschlußbetrieb der Leitung	682
6.13.3. Leitungen mit besonderen Eigenschaften	683
6.13.3.1. Lange Leitung	683
6.13.3.2. Verzerrungsfreie Leitung	684
6.13.3.3. Pupinisierte Leitung	685
6.13.3.4. Verlustlose Leitung	687
6.13.3.5. Die $\lambda/4$ -Leitung	692
6.14. Der Hertzsche Dipol	692
6.14.1. Die Maxwell'schen Gleichungen in komplexer Schreibweise	692
6.14.2. Integration der Maxwell'schen Gleichungen mit Hilfe des Hertz'schen Vektors	693
6.14.3. Integration der Strahlungsdichte in der Strahlungszone	701
7. Differentialgleichungen beliebiger linearer Netzwerke	703
7.1. Das allgemeine Verfahren zur Aufstellung der Differentialgleichungen	703
7.2. Abgekürzte Verfahren	705
7.2.1. Methode der selbständigen Maschenströme	705
7.2.2. Methode der Knotenpunktpotentiale	708
8. Ausgleichsvorgänge in linearen Netzwerken	713
8.1. Grundlagen	713
8.1.1. Schaltgesetze	713
8.1.2. Zerlegung des Ausgleichsvorgangs in eingeschwungene und flüchtige Vorgänge	715
8.1.3. Anfangsbedingungen	716

8.2. Untersuchung von Ausgleichsvorgängen in unverzweigten Stromkreisen nach der klassischen Methode	716
8.2.1. Ausgleichsvorgänge in einfachen Stromkreisen bei zeitlich konstanter EMK	717
8.2.1.1. Der einfache Stromkreis mit Induktivität und Widerstand	717
8.2.1.2. Der einfache Stromkreis mit Kapazität und Widerstand	721
8.2.2. Ausgleichsvorgänge in einfachen Kreisen bei zeitlich sinusförmiger EMK	723
8.2.2.1. Einschalten einer sinusförmigen Wechselspannung über einen Widerstand an eine Induktivität	723
8.2.2.2. Einschalten einer sinusförmigen Wechselspannung über einen Widerstand an eine Kapazität	725
8.2.3. Ausgleichsvorgänge in Schwingkreisen	727
8.2.3.1. Entladung eines Kondensators über Induktivität und Widerstand	727
8.2.3.2. Einschalten einer Gleichspannung an einen Schwingkreis	733
8.3. Klassische Methode zur Behandlung von Ausgleichsvorgängen in verzweigten linearen Netzwerken	735
8.3.1. Darstellung des allgemeinen Verfahrens	735
8.3.2. Beispiel für die Ermittlung eines Ausgleichsvorgangs in einem verzweigten Netzwerk	736
8.4. Behandlung von Ausgleichsvorgängen mittels der Operatorenrechnung	740
8.4.1. Laplace-Transformation	740
8.4.2. Rechenregeln für die Anwendung der Laplace-Transformation	741
8.4.2.1. Abbildung einer Summe mehrerer Originalfunktionen	741
8.4.2.2. Abbildung einer Funktion, die mit einer Konstante multipliziert ist	742
8.4.2.3. Abbildung der Ableitung im Zeitbereich	742
8.4.2.4. Ableitung im Bildbereich	743
8.4.2.5. Abbildung des Integrals der Originalfunktion	743
8.4.3. Abbildung einiger spezieller Funktionen	743
8.4.4. Rücktransformation. Methode der Aufspaltung	745
8.4.5. Netzwerksätze in Operatorenform	746
8.4.5.1. Das Ohmsche Gesetz in Operatorenform	746
8.4.5.2. Der Erste Kirchhoffsche Satz in Operatorenform	748
8.4.5.3. Der Zweite Kirchhoffsche Satz in Operatorenform	748
8.4.5.4. Operatorenschaltungen	749
8.4.6. Beispiel für die Anwendung der Operatorenmethode	750
8.5. Berechnung von Ausgleichsvorgängen mittels des Superpositionsprinzips	751
8.5.1. Wesen des Verfahrens	751
8.5.2. Übergangsfunktion	751
8.5.3. Integral von <i>Duhamel</i>	752
8.5.4. Beispiel für die Anwendung des Duhamelschen Integrals	753
9. Topologische Methoden der Netzwerkanalyse	755
9.1. Zuordnung von Graphen zu Netzwerken	755
9.1.1. Netzwerkgraph	755
9.1.2. Zusammenhängende Graphen. Komponenten des Graphen	756
9.2. Matrixdarstellung der Kirchhoffschen Sätze	758
9.2.1. Inzidenzmatrix. Kirchhoffscher Knotensatz	758
9.2.2. Schnittmatrix. Verallgemeinerter Kirchhoffscher Knotensatz	759
9.2.3. Maschenmatrix. Kirchhoffscher Maschensatz	761
9.3. Orthogonalität der Zeilenvektoren von $\ M\ $ und $\ S\ $	763
9.4. Satz von <i>Tellegen</i>	764

9.5. Netzwerkanalyse	765
9.5.1. Aufstellung des Gleichungssystems für lineare Gleichstromnetzwerke	765
9.5.1.1. Erfassung der physikalischen Eigenschaften der Zweige	765
9.5.1.2. Zweigstromanalyse	766
9.5.1.3. Maschenstromanalyse	767
9.5.1.4. Astspannungsanalyse	768
9.5.2. Aufstellung des Gleichungssystems für lineare <i>RLCM</i> -Netzwerke	768
Literatur	772
Namens- und Sachwörterverzeichnis	777