

# 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 Polarisation .....	44
1.2.2. Mathematische Beschreibung des Feldes im Dielektrikum .....	45
1.2.2.1. Vektor der Polarisation .....	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 Polarisation .....	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> .....	57
1.3.2.	Lösung der Feldgleichungen .....	57
1.3.2.1.	Der Greensche Satz .....	58
1.3.2.2.	Integration der Poissonschen Gleichung .....	60
1.3.2.3.	Eindeutigkeit der Lösung der Randwertaufgaben .....	61
1.4.	Die Integralparameter des elektrostatischen Feldes .....	61
1.4.1.	Kondensator .....	61
1.4.2.	Kapazität .....	62
1.4.3.	Schaltungen von Kondensatoren .....	62
1.4.3.1.	Parallelschaltung von Kondensatoren .....	63
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 Differenzgleichung .....	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 .....	256
2.10.1.2. Parallelschaltung von nichtlinearen Elementen .....	257
2.10.1.3. Reihen-Parallel-Schaltung dreier Elemente mit beliebigen Strom-Spannungs- Kennlinien .....	258
2.10.2. Beispiel einer analytischen Behandlung eines nichtlinearen Netzes .....	260
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 .....	367
3.9.3. Streufaktor und Kopplungsgrad .....	369
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 .....	370
3.10.1.2. Magnetische Energie in dem Feld zweier induktiv gekoppelter Stromkreise .....	370
3.10.1.3. Energie mehrerer gekoppelter Stromkreise .....	371
3.10.1.4. Energie des magnetischen Feldes und die Feldgrößen .....	372
3.10.1.5. Bestimmung der Induktivität aus der Energie des magnetischen Feldes ...	373
3.10.1.6. Energie magnetischer Felder in ferromagnetischen Stoffen .....	374
3.10.2. Kräfte im magnetischen Feld .....	374
3.10.2.1. Kraftwirkungen zwischen stromdurchflossenen Leitern .....	375
3.10.2.2. Kraftwirkung zwischen zwei parallelen langen Leitern .....	375
3.10.2.3. Ermittlung der mechanischen Kräfte aus energetischen Betrachtungen ...	375
<b>4. Das elektromagnetische Feld .....</b>	<b>379</b>
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
<b>5. Mechanismus der Stromleitung .....</b>	<b>398</b>
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.	Aktivierte 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. Sekundärelektronenemission .....	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 .....	467
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 Netzweigen .....	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 Fourier- sche 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 Wechsel- größen .....	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 nicht- sinusförmige 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 Maxwellschen Gleichungen in komplexer Schreibweise .....	692
6.14.2. Integration der Maxwellschen Gleichungen mit Hilfe des Hertzschen 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.	Operatoren-schaltungen .....	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
<b>Literatur .....</b>	<b>772</b>
<b>Namens- und Sachwörterverzeichnis .....</b>	<b>777</b>

1. Einleitung .....	1
2. Grundlagen der Elektrotechnik .....	1
2.1. Elektrische Ladung und Strom .....	1
2.2. Elektrisches Feld und Potential .....	1
2.3. Magnetisches Feld .....	1
2.4. Wechselstromrechnung .....	1
2.5. Leistungsberechnung .....	1
2.6. Transientenrechnung .....	1
2.7. Vierpolrechnung .....	1
2.8. Laplace-Transformation .....	1
2.9. Z-Transformation .....	1
2.10. Fourier-Transformation .....	1
2.11. DFT .....	1
2.12. FFT .....	1
2.13. Filterentwurf .....	1
2.14. Schaltungsregeln .....	1
2.15. Simulation .....	1
2.16. Messtechnik .....	1
2.17. Fehlerrechnung .....	1
2.18. Normierung .....	1
2.19. Dimensionierung .....	1
2.20. Fertigungstechnik .....	1
2.21. Sicherheit .....	1
2.22. Umweltschutz .....	1
2.23. Wirtschaftlichkeit .....	1
2.24. Dokumentation .....	1
2.25. Projektmanagement .....	1
2.26. Teamarbeit .....	1
2.27. Kommunikation .....	1
2.28. Präsentation .....	1
2.29. Abschlussarbeiten .....	1
2.30. Berufswahl .....	1
2.31. Weiterbildung .....	1
2.32. Karriere .....	1
2.33. Gesundheit .....	1
2.34. Freizeit .....	1
2.35. Familie .....	1
2.36. Soziale Verantwortung .....	1
2.37. Ethik .....	1
2.38. Recht .....	1
2.39. Steuern .....	1
2.40. Versicherungen .....	1
2.41. Bankwesen .....	1
2.42. Immobilien .....	1
2.43. Kunst .....	1
2.44. Sport .....	1
2.45. Musik .....	1
2.46. Literatur .....	1
2.47. Philosophie .....	1
2.48. Psychologie .....	1
2.49. Soziologie .....	1
2.50. Politik .....	1
2.51. Geschichte .....	1
2.52. Geographie .....	1
2.53. Biologie .....	1
2.54. Chemie .....	1
2.55. Physik .....	1
2.56. Mathematik .....	1
2.57. Informatik .....	1
2.58. Ingenieurwissenschaften .....	1
2.59. Medizin .....	1
2.60. Jura .....	1
2.61. Theologie .....	1
2.62. Sprachen .....	1
2.63. Fremdsprachen .....	1
2.64. Fremdsprachenlehre .....	1
2.65. Fremdsprachenpraxis .....	1
2.66. Fremdsprachenkurse .....	1
2.67. Fremdsprachenklausuren .....	1
2.68. Fremdsprachenzeugnisse .....	1
2.69. Fremdsprachenbewertung .....	1
2.70. Fremdsprachenrichtlinien .....	1
2.71. Fremdsprachenrichtlinienentwicklung .....	1
2.72. Fremdsprachenrichtlinienumsetzung .....	1
2.73. Fremdsprachenrichtlinienüberprüfung .....	1
2.74. Fremdsprachenrichtlinienrevidierung .....	1
2.75. Fremdsprachenrichtlinienfortschreibung .....	1
2.76. Fremdsprachenrichtlinienarchivierung .....	1
2.77. Fremdsprachenrichtlinienpublikation .....	1
2.78. Fremdsprachenrichtlinienverbreitung .....	1
2.79. Fremdsprachenrichtlinienbewertung .....	1
2.80. Fremdsprachenrichtlinienforschung .....	1
2.81. Fremdsprachenrichtlinienentwicklung .....	1
2.82. Fremdsprachenrichtlinienumsetzung .....	1
2.83. Fremdsprachenrichtlinienüberprüfung .....	1
2.84. Fremdsprachenrichtlinienrevidierung .....	1
2.85. Fremdsprachenrichtlinienfortschreibung .....	1
2.86. Fremdsprachenrichtlinienarchivierung .....	1
2.87. Fremdsprachenrichtlinienpublikation .....	1
2.88. Fremdsprachenrichtlinienverbreitung .....	1
2.89. Fremdsprachenrichtlinienbewertung .....	1
2.90. Fremdsprachenrichtlinienforschung .....	1
2.91. Fremdsprachenrichtlinienentwicklung .....	1
2.92. Fremdsprachenrichtlinienumsetzung .....	1
2.93. Fremdsprachenrichtlinienüberprüfung .....	1
2.94. Fremdsprachenrichtlinienrevidierung .....	1
2.95. Fremdsprachenrichtlinienfortschreibung .....	1
2.96. Fremdsprachenrichtlinienarchivierung .....	1
2.97. Fremdsprachenrichtlinienpublikation .....	1
2.98. Fremdsprachenrichtlinienverbreitung .....	1
2.99. Fremdsprachenrichtlinienbewertung .....	1
2.100. Fremdsprachenrichtlinienforschung .....	1