

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichenverzeichnis	XXVIII
--------------------------------	--------

1 Mathematik	1
1.1 Lineare Algebra	1
1.1.1 Vektorrechnung	1
1.1.1.1 Grundbegriffe und Definitionen	1
1.1.1.2 Rechenoperationen	1
1.1.1.3 Vektorrechnung unter Verwendung der Koordinaten	2
1.1.2 Matrizenrechnung	3
1.1.2.1 Grundbegriffe und Definitionen	3
1.1.2.2 Rechenoperationen	4
1.2 Funktionen	5
1.2.1 Grundbegriffe	5
1.2.1.1 Definition einer Funktion	5
1.2.1.2 Möglichkeiten der Darstellung einer Funktion	5
1.2.1.3 Einige Eigenschaften der Funktionen	5
1.2.1.4 Charakteristische Merkmale von Funktionen	6
1.2.1.5 Umkehrfunktion	6
1.2.1.6 Grenzwert der Funktionen	7
1.2.1.7 Stetigkeit der Funktionen	8
1.2.2 Ganze rationale Funktionen	9
1.2.2.1 Abspalten von Linearfaktoren	9
1.2.2.2 Horner-Schema	9
1.2.3 Gebrochene rationale Funktionen	9
1.2.4 Algebraische Funktionen	10
1.2.5 Potenz- und Wurzelfunktionen	10
1.2.6 Elementare transzendente Funktionen	11
1.2.6.1 Exponentialfunktionen	11
1.2.6.2 Logarithmusfunktionen	11
1.2.6.3 Trigonometrische Funktionen	12
1.2.6.4 Arcusfunktionen	14
1.2.6.5 Hyperbelfunktionen	15
1.2.6.6 Areafunktionen	16
1.3 Differentialrechnung	17
1.3.1 Einleitung	17
1.3.2 Ableitung einiger Funktionen	18
1.3.3 Rechenregeln der Differentialrechnung	18
1.3.3.1 Ableitung einer Funktion mit konstantem Faktor	18
1.3.3.2 Ableitung der Summe mehrerer Funktionen (Summenregel)	18
1.3.3.3 Ableitung des Produktes mehrerer Funktionen (Produktregel)	19
1.3.3.4 Ableitung des Quotienten zweier Funktionen (Quotientenregel)	19
1.3.3.5 Ableitung der mittelbaren Funktion (Kettenregel)	19
1.3.4 Anwendungen der Differentialrechnung	19
1.3.4.1 Grenzwertbestimmung mit Hilfe des Satzes von de l'Hospital	19
1.3.4.2 Kurvendiskussion	20
1.4 Integralrechnung	20
1.4.1 Unbestimmtes Integral	20
1.4.2 Partikuläres Integral	21
1.4.3 Bestimmtes Integral	21
1.4.4 Grundintegrale	21

1.4.5	Integrationsregeln	21
1.4.5.1	Summenregel	21
1.4.5.2	Faktorenregel	22
1.4.5.3	Vertauschen der Integrationsgrenzen	22
1.4.5.4	Zerlegung des Integrationsintervalles	22
1.4.6	Integrationsmethoden	22
1.4.6.1	Substitution	22
1.4.6.2	Partielle Integration	22
1.4.6.3	Integration gebrochen rationaler Funktionen	22
1.4.7	Anwendungen der Integralrechnung	23
1.4.7.1	Berechnung der Bogenlänge einer ebenen Kurve	23
1.4.7.2	Flächeninhalt	23
1.4.7.3	Mantelfläche und Volumen eines Rotationskörpers	23
1.4.7.4	Schwerpunktskoordinaten	23
1.5	Komplexe Zahlen	24
1.5.1	Definitionen	24
1.5.2	Rechenregeln	24
1.5.2.1	Addition und Subtraktion komplexer Zahlen	24
1.5.2.2	Multiplikation einer komplexen Zahl mit einer reellen Zahl	24
1.5.2.3	Multiplikation komplexer Zahlen	24
1.5.2.4	Division komplexer Zahlen	24
1.5.3	Gaußsche Zahlenebene	25
1.5.4	Euler-Gleichung; Potenzieren, Radizieren und Logarithmus der komplexen Zahlen	25
1.5.5	Anwendung der komplexen Rechnung	26
1.6	Fourier-Reihen	26
1.6.1	Fourier-Reihe der periodischen Funktionen	26
1.6.2	Harmonische Analyse	28
1.6.3	Wichtige Fourierentwicklungen	29
1.7	Laplace-Transformation	30
1.7.1	Grundbegriffe	30
1.7.2	Sätze der Laplace-Transformation	30
1.7.3	Laplace-Transformation der periodischen Funktionen	32
1.7.4	Laplace-Transformierte der wichtigsten periodischen Funktionen	33
1.7.5	Inverse Laplace-Transformation	33
1.8	Gewöhnliche Differentialgleichungen	35
1.8.1	Begriffe und Klassifizierung	35
1.8.2	Lösung der Differentialgleichungen 1. Ordnung	35
1.8.2.1	Differentialgleichungen mit trennbaren Variablen	35
1.8.2.2	Durch Substitution lösbare Differentialgleichungen	35
1.8.2.3	Lineare Differentialgleichungen	36
1.8.3	Lösungsweg der auf Differentialgleichungen 1. Ordnung zurückführbaren Differentialgleichungen 2. Ordnung	38
1.8.4	Lösung der linearen Differentialgleichungen mit konstanten Koeffizienten	39
1.9	Literatur	41

2 Grundlagen der Elektrotechnik 42

2.1	Grundgrößen des elektrischen Strömungsfeldes	42
2.1.1	Ladung	42
2.1.2	Elektrisches Feld	42
2.1.3	Strom, Stromdichte	42
2.1.4	Energie, Leistung, Spannung, Potential	43
2.1.5	Widerstand	44
2.1.6	Beispiele	45
2.2	Unverzweigter Stromkreis an Gleichspannung	45
2.2.1	Befeilung an einem Zweipol	45
2.2.2	Reihenschaltung von Widerständen bzw. Spannungsquellen	46
2.2.3	Arbeitspunkt im Strom-Spannungs-Diagramm	46

2.3	Verzweigter Stromkreis an Gleichspannung	47
2.3.1	Parallelschaltung von Widerständen	47
2.3.2	Belasteter Spannungsteiler	47
2.3.3	Kompensationsschaltung	47
2.3.4	Brückenschaltung	47
2.3.5	Stern-Dreieck-Transformation	48
2.3.6	Äquivalente Ersatzquellen	48
2.4	Berechnung linearer Netze an Gleichspannung	49
2.4.1	Direkte Anwendung der Kirchhoffschen Gesetze	49
2.4.2	Überlagerungsverfahren	49
2.4.3	Ersatzzweipolquelle	49
2.4.4	Maschenstromverfahren	50
2.4.5	Knotenpotentialverfahren	50
2.5	Elektrische Energie und Leistung bei Gleichspannung	51
2.5.1	Wirkungsgrad und Anpassung	51
2.5.2	Reflexion	51
2.6	Elektrostatisches Feld	52
2.6.1	Grundbegriffe	52
2.6.2	Berechnung elektrostatischer Felder	52
2.6.2.1	Feld einer geladenen Kugel	53
2.6.2.2	Feld eines langen, geraden Leiters	53
2.6.2.3	Feld in der Umgebung mehrerer Ladungen	53
2.6.2.4	Feld an Grenzflächen	53
2.6.3	Kapazität von Kondensatoren	54
2.6.4	Energie des elektrischen Feldes	54
2.6.5	Kräfte im elektrischen Feld	55
2.6.6	Beispiele	55
2.7	Magnetisches Feld	55
2.7.1	Grundbegriffe	55
2.7.2	Berechnung magnetischer Felder bei $\mu_r = \text{const}$	57
2.7.2.1	Stromdurchflossener Leiter	57
2.7.2.2	Koaxialkabel	57
2.7.2.3	Magnetfeld zweier paralleler Leiter	57
2.7.2.4	Zylinderspule, Ringspule	57
2.7.2.5	Magnetischer Kreis mit abschnittsweise homogenen Teilfeldern	58
2.7.2.6	Magnetisches Feld an der Grenze zweier Werkstoffe	58
2.7.3	Berechnung magnetischer Kreise mit Eisen	58
2.7.4	Magnetische Kreise mit Dauermagneten	59
2.8	Induktionsvorgänge	60
2.8.1	Induktionsgesetz	60
2.8.2	Selbstinduktion, Selbstinduktivität	62
2.8.2.1	Zylinderspule bzw. Ringspule	62
2.8.2.2	Doppelleitung der Länge l	62
2.8.2.3	Koaxialkabel	62
2.8.3	Gegeninduktion, Gegeninduktivität	63
2.9	Energie und Kraft im magnetischen Feld	64
2.10	Zusammenstellung zum elektrischen und magnetischen Feld	66
2.10.1	Stationäres elektrisches Strömungsfeld	66
2.10.2	Elektrostatisches Feld	66
2.10.3	Magnetisches Feld	67
2.11	Sinusförmige Wechselgrößen	67
2.11.1	Benennungen und Festlegungen	67
2.11.2	Komplexe Darstellung	68
2.12	Passive Zweipole im Wechselstromkreis	69
2.12.1	Widerstand	69
2.12.2	Induktivität	70
2.12.3	Kapazität	70
2.12.4	Allgemeiner passiver Zweipol	71

2.12.5	Grundsaltungen bei Wechselstrom	71
2.12.5.1	Spannungsteiler	71
2.12.5.2	Stromteiler	71
2.12.5.3	Brückenschaltung	72
2.12.5.4	Reihen- und Parallel-Ersatzschaltung	72
2.12.5.5	Wirkungsgrad, Anpassung, Reflexionsfaktor	72
2.12.5.6	Blindleistungskompensation (Verbesserung des Leistungsfaktors)	73
2.12.5.7	Resonanz	73
2.13	Ortskurven	74
2.13.1	Allgemeines	74
2.13.2	Inversion	74
2.13.3	Gerade	75
2.13.4	Kreis durch den Nullpunkt	75
2.13.5	Kreis in allgemeiner Lage	77
2.13.6	Beispiele	77
2.14	Drosselspule und Transformator	77
2.14.1	Drosselspule mit Eisenkern	77
2.14.2	Der lineare Übertrager (Lufttransformator)	77
2.14.3	T-Ersatzschaltung des Transformators	78
2.15	Drehstromsystem	79
2.15.1	Erzeugung des Drehstromes	79
2.15.2	Verbraucherschaltungen	80
2.15.3	Leistung bei Drehstrom	81
2.15.4	Beispiele	81
2.16	Schaltvorgänge	82
2.16.1	Gesetze der Ausgleichsvorgänge in linearen Systemen	82
2.16.2	Einschalten	83
2.16.3	Ausschalten	84
2.17	Wanderwellen auf elektrischen Leitungen	85
2.17.1	Allgemeines	85
2.17.2	Reflexion und Brechung	85
2.17.3	Beispiele	86
2.18	Literatur	87

3 Werkstoffe 89

3.1	Aufbau der festen Körper	89
3.1.1	Werkstoffe	89
3.1.2	Kristalle	89
3.1.3	Elementarzelle	89
3.1.4	Gitterfehler	90
3.2	Elektrische Leitfähigkeit	91
3.2.1	Leitungsmechanismus	91
3.2.2	Isolator	93
3.2.3	Halbleiter	93
3.2.4	Normalleiter	93
3.2.5	Supraleiter	94
3.2.6	Halleffekt	94
3.3	Elektrische Leiter	96
3.3.1	Normalleiter	96
3.3.2	Halbleiter	97
3.3.2.1	Dotierung	97
3.3.2.2	Verbindungshalbleiter	99
3.3.3	Supraleiter	99
3.4	Magnetische Leitfähigkeit	99
3.4.1	Modellvorstellung	99
3.4.2	Verhalten von Materie im Magnetfeld	100
3.4.2.1	Diamagnetismus	100
3.4.2.2	Paramagnetismus	100
3.4.2.3	Ferromagnetismus	100
3.4.2.4	Antiferromagnetismus	100
3.4.2.5	Ferrimagnetismus	100

3.4.3	Magnetisierung	100
3.4.4	Magnetisierungskurve	101
3.4.4.1	Verluste	102
3.4.5	Permeabilität	102
3.4.5.1	Anfangspermeabilität	102
3.4.5.2	Wechselfeldpermeabilität	103
3.4.5.3	Reversible Permeabilität	103
3.5	Magnetika	103
3.5.1	Metalloxide (Ferrite)	103
3.5.2	Weichmagnetika	104
3.5.2.1	Metalle	104
3.5.2.2	Legierungen	104
3.5.2.3	Weichmagnetische Ferrite	106
3.5.3	Hartmagnetika (Dauermagnete)	107
3.5.3.1	Entmagnetisierungskurve	107
3.5.3.2	Hartmagnetische Legierungen	108
3.5.3.3	Hartmagnetische Metalloxide, Ferrite	109
3.6	Dielektrische Eigenschaften	109
3.6.1	Modellvorstellungen zur dielektrischen Polarisisation	109
3.6.1.1	Elektronenpolarisation	109
3.6.1.2	Ionenpolarisation	109
3.6.1.3	Ordnungspolarisation	109
3.6.1.4	Grenzflächenpolarisation	110
3.6.2	Dielektrische Materialeinteilung	110
3.6.2.1	Ferroelektrika	110
3.6.2.2	Piezoelektrika	110
3.6.2.3	Pyroelektrika	110
3.6.3	Elektrische Materialeinteilung	110
3.6.3.1	Isolatoren	110
3.6.3.2	Kondensatoren	111
3.7	Dielektrika	112
3.7.1	Natürliche anorganische Dielektrika	112
3.7.1.1	Glimmer	112
3.7.1.2	Quarz	112
3.7.1.3	Gase	113
3.7.2	Natürliche organische Dielektrika	113
3.7.2.1	Papier	113
3.7.2.2	Textilstoffe	113
3.7.2.3	Öle	113
3.7.3	Künstliche anorganische Dielektrika	113
3.7.3.1	Metalloxide	113
3.7.3.2	Porzellan	113
3.7.3.3	Titanate	113
3.7.4	Künstliche organische Dielektrika	113
3.7.4.1	Zellulosekunststoffe	113
3.7.4.2	Chlophene	113
3.7.4.3	Polykondensationsprodukte	114
3.7.4.4	Polymerisationsprodukte	114
3.7.4.5	Silikone	114
3.8	Literatur	115

4 Technische Mechanik 116

4.1	Statik	116
4.1.1	Grundlagen	116
4.1.1.1	Die Kraft	116
4.1.1.2	Moment einer Einzelkraft (Kraftmoment)	116
4.1.1.3	Das Kräftepaar (Drehmoment)	116
4.1.1.4	Die drei Grundoperationen (Arbeitssätze der Statik)	116
4.1.1.5	Das Freimachen der Körper	117

4.1.2	Zusammensetzen, Zerlegen und Gleichgewicht von Kräften in der Ebene	119
4.1.2.1	Zentrales ebenes Kräftesystem	119
4.1.2.2	Allgemeines Kräftesystem	121
4.1.3	Schwerpunkt (Massenmittelpunkt)	123
4.1.3.1	Bestimmung des Schwerpunktes	123
4.1.3.2	Schwerpunkt wichtiger Linien, Flächen und Körper	125
4.1.4	Guldinsche Regeln	128
4.1.4.1	Oberfläche eines Rotationskörpers	128
4.1.4.2	Rauminhalt eines Rotationskörpers	128
4.1.5	Reibung	128
4.1.5.1	Gleitreibung	128
4.1.5.2	Haftreibung	129
4.1.5.3	Bestimmung der Gleit- und Haftreibzahl	130
4.1.5.4	Reibung auf der schiefen Ebene	130
4.2	Dynamik	131
4.2.1	Mechanische Größen	131
4.2.1.1	Mechanische Arbeit	131
4.2.1.2	Leistung	134
4.2.1.3	Wirkungsgrad	134
4.2.1.4	Übersetzung (Übersetzungsverhältnis)	135
4.2.2	Dynamik der Translation (Verschiebewegung) des starren Körpers	135
4.2.2.1	Dynamisches Grundgesetz	135
4.2.2.2	Energie, Energieerhaltungssatz	136
4.2.2.3	Impuls, Impulserhaltungssatz	137
4.2.2.4	d'Alembertscher Satz	137
4.2.3	Dynamik der Rotation des starren Körpers	138
4.2.3.1	Dynamisches Grundgesetz für die Rotation um eine feste Achse	138
4.2.3.2	Trägheitsmoment (Massenmoment 2. Grades), Trägheitsradius	138
4.2.3.3	Rotationsenergie (Bewegungsenergie bei Rotation)	141
4.2.3.4	Energieerhaltungssatz für Rotation	141
4.2.3.5	Drehimpuls (Drall)	141
4.2.3.6	Fliehkraft	141
4.2.4	Gegenüberstellung der Gesetze für Translation und Rotation	143
4.3	Festigkeitslehre	144
4.3.1	Aufgaben der Festigkeitslehre	144
4.3.2	Schnittverfahren	144
4.3.3	Spannung	145
4.3.3.1	Spannungsbegriff	145
4.3.3.2	Spannungsarten	145
4.3.4	Formänderung	145
4.3.5	Hookesches Gesetz (Elastizitätsgesetz)	146
4.3.6	Grundbeanspruchungsarten	146
4.3.6.1	Zugbeanspruchung (Zug)	146
4.3.6.2	Druckbeanspruchung (Druck)	146
4.3.6.3	Biegebeanspruchung (Biegung)	146
4.3.6.4	Knickbeanspruchung (Knickung)	147
4.3.6.5	Abscherbeanspruchung (Abscheren)	147
4.3.6.6	Torsion (Verdrehbeanspruchung)	147
4.3.7	Zusammengesetzte Beanspruchung (Überblick)	147
4.3.8	Hauptgleichungen der Festigkeitslehre	148
4.3.8.1	Zug und Druck	148
4.3.8.2	Biegung	150
4.3.8.3	Abscheren	154
4.3.8.4	Torsion (Verdrehung)	155
4.3.9	Zusammengesetzte Beanspruchungen	157
4.3.9.1	Gleichzeitiges Auftreten mehrerer Normalspannungen	157
4.3.9.2	Gleichzeitiges Auftreten mehrerer Schubspannungen	159
4.3.9.3	Gleichzeitiges Auftreten von Normal- und Schubspannungen	159

5 Lichttechnik	161
5.1 Technische Optik	161
5.1.1 Brechung und Reflexion	161
5.1.1.1 Brechungs- und Reflexionsgesetz	161
5.1.1.2 Vektoriell Brechungs- und Reflexionsgesetz	161
5.1.1.3 Eigenschaften optischer Glasarten	162
5.1.2 Optische Abbildungen	163
5.1.2.1 Abbildung durch eine dünne Linse	163
5.1.2.2 Abbildung durch eine sphärische Fläche	163
5.1.2.3 Abbildung durch paraxiale Strahlen	164
5.1.2.4 Optische Daten einer Linse für paraxiale Strahlen	165
5.1.2.5 Mehrlinsige Systeme	165
5.1.2.6 Blenden, Pupillen, Luken	166
5.1.2.7 Feldlinsen, Kondensoren	167
5.2 Lichtstrahlung	167
5.2.1 Strahlungsphysikalische und lichttechnische Größen	167
5.2.1.1 Raumwinkel	167
5.2.1.2 Strahlungsphysikalische und lichttechnische Berechnungsgrundlagen	167
5.2.2 Strahlungsgesetze	169
5.2.2.1 Plancksches Strahlungsgesetz	169
5.2.2.2 Stefan-Boltzmannsches Gesetz	169
5.2.2.3 Wiensches Verschiebungsgesetz	170
5.2.2.4 Reflexion, Absorption, Transmission	170
5.2.2.5 Kirchhoffsches Strahlungsgesetz	170
5.2.2.6 Lambertsches Gesetz	171
5.2.2.7 Fotometrisches Grundgesetz	171
5.2.2.8 Spezifische Ausstrahlung oder Lichtausstrahlung eines Flächenstrahlers	171
5.2.2.9 Fotometrische Bewertung einer Strahlung	171
5.2.2.10 Fotometrische Bewertung einer Strahlung durch einen nichtverstärkenden Fotoempfänger	172
5.3 Optoelektronische Bauelemente	173
5.3.1 Sender	173
5.3.1.1 Glühlampen	173
5.3.1.2 Entladungslampen	173
5.3.1.3 Lumineszenzdioden	173
5.3.1.4 Laser	174
5.3.2 Empfänger	174
5.3.2.1 Fotowiderstände	174
5.3.2.2 Fotodioden	175
5.3.2.3 Bewertung einer Strahlung durch eine Fotodiode	176
5.3.2.4 Fototransistoren	177
5.4 Beleuchtungstechnik	177
5.4.1 Punktstrahler	177
5.4.2 Straßenbeleuchtung	178
5.4.3 Arbeitsplatzbeleuchtung	178
5.4.3.1 Beleuchtungsstärke	178
5.4.3.2 Blendungsbegrenzung	179
5.5 Literatur	180
6 Datenverarbeitung	181
6.1 Grundlagen der Datenverarbeitung	181
6.1.1 Daten und Datendarstellung	181
6.1.2 Darstellung von Zahlen	181
6.1.2.1 Binär codierte Dezimalzahlen	181
6.1.2.2 Dezimalzahlen dual verschlüsselt	181
6.1.3 Darstellung von Zeichen	182
6.1.4 Die Verarbeitung analoger Signale	182
6.1.5 Zahlensysteme	182

6.1.6	Zahenumwandlung	182
6.1.7	Rechenregeln für Dualzahlen	183
6.1.7.1	Addition von Dualzahlen	184
6.1.7.2	Multiplikation von Dualzahlen	184
6.1.7.3	Subtraktion von Dualzahlen	184
6.1.7.4	Division von Dualzahlen	185
6.1.8	Logische Verknüpfungen	185
6.1.9	Rechenschaltungen	186
6.1.9.1	Addierer	186
6.1.9.2	Subtrahierschaltung	187
6.1.10	Wertebereich	187
6.1.11	Festpunkt- und Gleitpunktzahlen	187
6.1.11.1	Festpunktdarstellung	188
6.1.11.2	Gleitpunktdarstellung	188
6.2	Aufbau und Arbeitsweise von DV-Systemen	191
6.2.1	Die klassische Rechnerstruktur	191
6.2.2	Rechnereinteilung	192
6.2.3	Systemkomponenten	192
6.2.3.1	Die Zentraleinheit	192
6.2.3.2	Der Speicher	193
6.2.3.3	Die Ein-Ausgabe-Einheit	193
6.2.3.4	Die Busstruktur	193
6.2.4	Arbeitsweise eines DV-Systems	193
6.2.5	Die Steuerung digitaler Rechner	194
6.2.5.1	Die Arbeitsweise der Zentraleinheit	195
6.2.5.2	Funktion einer mikroprogrammierten Steuerung	195
6.2.6	Mikroprozessorstrukturen	195
6.2.7	Rechnerperipherie	196
6.2.7.1	Physikalische Grundlagen	196
6.2.7.2	Magnetomotorische Speicher	196
6.2.7.3	Optische Speicherprinzipien	199
6.2.7.4	Mikroprozessorbuse	200
6.2.8	Daten- und Befehlsstrukturen	204
6.2.8.1	Datentypen, Datenformate	204
6.2.8.2	Befehlsformate	204
6.2.9	Adressierungsarten	204
6.2.10	Mikroprozessor-Befehlsgruppen	204
6.2.10.1	Datentransportbefehle	204
6.2.10.2	Arithmetische und logische Befehle	204
6.2.10.3	Bitverarbeitende Befehle	204
6.2.10.4	Schiebe- und Rotationsbefehle	205
6.2.10.5	Sprungbefehle	205
6.2.10.6	Stringbefehle	205
6.2.10.7	Systembefehle	205
6.2.11	Maschinensprache, Assembler, Compiler	205
6.2.11.1	Maschinensprache	205
6.2.11.2	Assemblersprache	205
6.2.11.3	Hochsprachen	205
6.2.12	Betriebssystem	205
6.3	Programmerstellung und Dokumentation	205
6.3.1	Abschnitte der Programmdokumentation	205
6.3.1.1	Die Darstellung des Lösungskonzepts	205
6.3.1.2	Die Darstellung des Programmablaufes	206
6.3.1.3	Die Benutzeranleitung	206
6.3.1.4	Der Testbericht	206
6.3.2	Programmstrukturen	206
6.3.2.1	Der Block	206
6.3.2.2	Die Sequenz	206
6.3.2.3	Alternative und Fallabfrage	207
6.3.2.4	Die bedingte Wiederholung	207

6.4	Anhang	209
	Anhang 1: Übersicht über einige Codierungen der Dezimalzahlen	209
	Anhang 2: Zusammenstellung einiger Codierungen	209
	Anhang 3: Steuerzeichen	210
6.5	Literatur	212

7 Elektrische Meßtechnik 214

7.1	Grundbegriffe	214
7.1.1	Der Vorgang des Messens	214
7.1.2	Das SI-Einheitensystem	214
7.1.3	Meßfehler	216
7.1.4	Fehlerfortpflanzung	217
7.1.5	Angabe und Darstellung von Meßergebnissen	217
7.1.6	Anzeige von Meßergebnissen	218
7.1.7	Arbeitsprinzipien elektrischer Meßgeräte	219
7.1.8	Gleich- und Wechselvorgänge, Mittelwerte	219
7.2	Messung elektrischer Größen	221
7.2.1	Messung von elektrischem Strom und elektrischer Spannung	221
7.2.1.1	Gleichstrom und Gleichspannung	221
7.2.1.2	Wechselstrom- und Wechselspannungsmessungen	224
7.2.1.3	Meßbereichserweiterungen	226
7.2.1.4	Kompensationsverfahren	229
7.2.2	Messung elektrischer Wirk- und Blindwiderstände	229
7.2.2.1	Wirkwiderstände	229
7.2.2.2	Blindwiderstände	232
7.2.2.3	Messung der Gegeninduktivität	236
7.2.2.4	Messung von Größen des Trafo-Ersatzschaltbildes	236
7.2.3	Messung elektrischer Leistung und Energie	236
7.2.3.1	Leistung bei Gleichstrom	236
7.2.3.2	Leistung bei Wechselstrom	236
7.2.3.3	Leistung bei Drehstrom	238
7.2.3.4	Messung elektrischer Energie	240
7.2.4	Messung von Phasenwinkel und Leistungsfaktor	241
7.2.4.1	Phasenwinkel	241
7.2.4.2	Leistungsfaktor	241
7.2.5	Messung von Frequenz und Zeitintervall	242
7.2.5.1	Amplituden-analoge Meßverfahren	242
7.2.5.2	Digitale Meßverfahren	243
7.3	Aufzeichnende Meßgeräte	245
7.3.1	Elektromechanische Registriergeräte	245
7.3.2	Oszilloskope	246
7.3.2.1	Analoge Oszilloskope	247
7.3.2.2	Digitale Oszilloskope	249
7.4	Die Messung magnetischer Größen	249
7.4.1	Bestimmung magnetischer Feldgrößen	249
7.4.1.1	Messung des magnetischen Flusses	250
7.4.1.2	Messung der magnetischen Flußdichte und Feldstärke	250
7.4.1.3	Kalibrierung von Feldsonden	251
7.4.1.4	Messung der magnetischen Spannung V_m	251
7.4.2	Bestimmung von Materialkenngrößen ferromagnetischer Stoffe	252
7.4.2.1	Meßaufbau	252
7.4.2.2	Messung der Magnetisierungskurven	252
7.4.2.3	Messung der Hysteresekurve	252
7.5	Elektrische Messung nichtelektrischer Größen	253
7.5.1	Meßaufnehmer-Wirkungsprinzipien	254
7.5.1.1	Passive Sensoren	255
7.5.1.2	Aktive Sensoren	258
7.5.1.3	Digital kodierte Sensoren	260

7.5.2	Anwendungsbeispiele	261
7.5.2.1	Drehzahlmessung	261
7.5.2.2	Drehmomentmessung	261
7.5.2.3	Geräuschmessung	261
7.6	Digitale Meßwertverarbeitung	261
7.6.1	Meßwertumsetzer	262
7.6.1.1	Digital-Analog-Umsetzer (DAU)	262
7.6.1.2	Analog-Digital-Umsetzer (ADU)	262
7.6.2	Fehlereinflüsse	264
7.6.2.1	Quantisierungsfehler	264
7.6.2.2	Transferfehler	265
7.6.2.3	Einfluß der Umsetzzeit	265
7.7	Fernmessungen	265
7.7.1	Direkte Fernmessung	265
7.7.2	Trägerfrequenzverfahren	266
7.7.3	Impuls-Fernübertragungs-Verfahren	266
7.7.4	Mehrfach-Übertragungs-Verfahren	267
7.7.4.1	Frequenz-Multiplex-Verfahren	267
7.7.4.2	Zeit-Multiplex-Verfahren	267
7.8	Programmierbare Meßsysteme	267
7.8.1	Netzwerkkonfigurationen und Datenübertragungsformen	267
7.8.1.1	Netzwerkkonfigurationen	267
7.8.1.2	Datenübertragungsformen	267
7.8.2	Eingeführte Systeme	269
7.8.2.1	Die V.24-Schnittstelle	269
7.8.2.2	Der IEC-625-Bus	270
7.8.2.3	Typisches Meßgerätesystem	272
7.8.2.4	Weitere Datensysteme	272
7.9	Elektromagnetische Störeinflüsse auf elektrische Meßsysteme	273
7.9.1	Das Störübertragungssystem	273
7.9.2	Ursachen unerwünschter Verkopplungen	274
7.9.2.1	Galvanische Verkopplung	274
7.9.2.2	Induktive Verkopplung	274
7.9.2.3	Kapazitive Verkopplung	274
7.9.2.4	Elektromagnetische Verkopplung	275
7.9.2.5	Elektrostatische Aufladungen	275
7.10	Literatur	275

8 Industrie- und Leistungselektronik 276

8.1	Leistungshalbleiter	276
8.1.1	Halbleiterdioden	276
8.1.1.1	Aufbau, statisches Verhalten, Kenngrößen, Grenzwerte	276
8.1.1.2	Dynamisches Verhalten	276
8.1.1.3	Verlustleistung	277
8.1.1.4	Bauarten	277
8.1.1.5	Schutzschaltungen, TSE-Beschaltung	277
8.1.1.6	Sicherungen	278
8.1.1.7	Zusammenschaltung von Dioden	278
8.1.2	Bipolartransistoren	279
8.1.2.1	Aufbau, statisches Verhalten, Kenngrößen, Grenzwerte	279
8.1.2.2	Dynamisches Verhalten	280
8.1.2.3	Verlustleistung	281
8.1.2.4	Bauarten	282
8.1.2.5	Schutzschaltungen	282
8.1.2.6	Parallelschaltung von bipolaren Transistoren	282

8.1.3	Feldeffekttransistoren	283
8.1.3.1	Aufbau, statisches Verhalten, Kenngrößen, Grenzwerte	283
8.1.3.2	Dynamisches Verhalten	284
8.1.3.3	Verlustleistung	284
8.1.3.4	Schutzschaltungen	284
8.1.3.5	Zusammenschaltung von Feldeffekttransistoren	285
8.1.4	IGBT-Transistoren	285
8.1.4.1	Aufbau von IGBT-Transistoren	285
8.1.4.2	BIMOS-Schaltstufe	286
8.1.5	Thyristoren	286
8.1.5.1	Aufbau, statisches Verhalten, Kenngrößen, Grenzwerte	286
8.1.5.2	Dynamisches Verhalten	287
8.1.5.3	Verlustleistung	288
8.1.5.4	Bauarten	288
8.1.5.5	Schutzschaltungen	289
8.1.5.6	Zusammenschaltung von Thyristoren	290
8.2	Wärmeableitung, Schutzschaltungen, Ansteuerschaltungen	290
8.2.1	Wärmeableitung	290
8.2.2	Überspannungsschutz	293
8.2.3	Überstromschutz	293
8.2.4	Ansteuerschaltungen	294
8.2.4.1	Ansteuersignale für Bipolartransistoren	294
8.2.4.2	Ansteuersignale für Feldeffekttransistoren und IGBT	295
8.2.4.3	Ansteuersignale für Thyristoren	296
8.2.4.4	Ansteuersignale für GTO-Thyristoren	297
8.3	Stromrichter-Transformatoren und -Drosseln	298
8.3.1	Allgemeines	298
8.3.2	Stromrichter-Transformatoren	298
8.3.3	Drosseln	299
8.4	Stromrichterschaltungen	300
8.4.1	Übersicht (Klassifizierung)	300
8.4.2	Netzgeführte Stromrichter	301
8.4.2.1	Begriffe	301
8.4.2.2	Einsatz	303
8.4.2.3	Gleichspannungsbildung	304
8.4.2.4	Ideelle Ausgangsgleichspannung	307
8.4.2.5	Ideelle Gleichstromleistung	307
8.4.2.6	Ausgangskennlinienfeld	307
8.4.2.7	Betriebsquadranten	308
8.4.2.8	Leistungsaufnahme	308
8.4.2.9	Verknüpfung mit dem Steuerwinkel α	309
8.4.2.10	Netzrückwirkungen	310
8.5	Lastgeführte Stromrichter	311
8.5.1	Übersicht	311
8.5.2	Stromrichtermotor	311
8.5.3	Schwingkreiswechselrichter	312
8.5.3.1	Parallelschwingkreis-Wechselrichter	312
8.5.3.2	Reihenschwingkreis-Wechselrichter	313
8.6	Selbstgeführte Stromrichter	313
8.6.1	Gleichstromsteller	313
8.6.1.1	1-Quadranten-Betrieb	314
8.6.1.2	4-Quadranten-Betrieb	315
8.6.2	Umrichter	316
8.6.2.1	Übersicht	316
8.6.2.2	Gleichstromumrichter mit Wechselspannungszwischenkreis (Schaltnetzteile)	316
8.6.2.3	Umrichter mit Spannungszwischenkreis (<i>U</i> -Umrichter)	317
8.6.2.4	Umrichter mit Stromzwischenkreis (<i>I</i> -Umrichter)	320
8.6.2.5	Energierückspeisung	322
8.6.2.6	Untersynchrone Stromrichtererkaskade <i>USK</i>	325
8.6.2.7	Direktumrichter	325

8.7	Wechsel-Drehstromsteller (Wechselwegschaltungen)	326
8.7.1	Wechselstromsteller (Wechselwegschaltung)	326
8.7.2	Drehstromsteller (Wechselwegschaltung)	327
8.7.3	Steuer-Blindleistung	328
8.7.4	Steuerung	328
8.8	Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) und Netzurückwirkungen von Umrichtern	329
8.8.1	Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV)	329
8.8.2	Netzurückwirkungen	330
8.9	Regelung bei Stromrichtern	332
8.9.1	Übersicht	332
8.9.2	Gleichstromantriebe	333
8.9.3	Drehstromantriebe mit Umrichter	334
8.10	Einsatz in der Energie-Anwendung	338
8.10.1	Allgemeines zum Einsatz in der Energie-Anwendung	338
8.10.1.1	Stromrichterantriebe	338
8.10.1.2	Stromrichterantriebe mit Stromwendermaschinen	339
8.10.1.3	Stromrichterantriebe mit Drehfeldmaschinen	343
8.10.1.4	EK-Maschine (elektronisch kommutiert)	347
8.10.1.5	Positionierantriebe/Servoantriebe	347
8.10.1.6	Traktion	347
8.10.2	Gleichstromversorgungen	348
8.10.2.1	Elektrochemie	348
8.10.2.2	Ladegeräte	348
8.10.2.3	Netzgeräte	348
8.10.3	Sonstige Anwendungsgebiete	348
8.10.3.1	Heizungs- und Klimatechnik, Beleuchtung	348
8.10.3.2	Hausgeräte	348
8.10.3.3	Industrielle Wärmebehandlung	348
8.11	Einsatz in der Energie-Verteilung	348
8.11.1	Übersicht	348
8.11.2	Blindstromrichter	348
8.11.3	Netzkupplung und Energieübertragung (HGÜ)	349
8.11.4	Unterbrechungslose Stromversorgung	350
8.11.5	Rundsteuersender	350
8.12	Stromrichtermeßtechnik	350
8.12.1	Messungen allgemein	350
8.12.2	Messung des Formfaktors	352
8.12.3	Drehfeldmessung	352
8.13	Literatur	352

9 Elektrische Maschinen und Antriebe 354

9.1	Grundbegriffe und Normen	354
9.1.1	Übersicht	354
9.1.2	Geschichtliches	354
9.1.3	Normen	355
9.1.4	Leistungsschild	355
9.2	Elektrische Antriebe	358
9.2.1	Allgemeine antriebstechnische Grundlagen	358
9.2.1.1	Energiesatz	358
9.2.1.2	Getriebe	359
9.2.1.3	Beispiel	361
9.2.2	Betriebsquadranten	361
9.2.3	Kennlinien	361
9.2.3.1	Kennlinien elektrischer Maschinen	361
9.2.3.2	Kennlinien der Arbeitsmaschinen	361
9.2.4	Stabiler Betriebspunkt	362

9.2.5	Betrieb und Übergangsvorgänge	363
9.2.5.1	Übergangszustände	363
9.2.5.2	Hochlauf-/Bremszeit	363
9.2.5.3	Stationärer Betrieb	364
9.2.5.4	Energiebetrachtung	364
9.2.5.5	Leerhochlauf	364
9.2.5.6	Lastanlauf	365
9.2.5.7	Beispiele	365
9.2.6	Erwärmung	366
9.2.7	Betriebsarten S1 bis S9	367
9.2.8	Leistungsänderungen	370
9.2.8.1	Leistungssteigerung	370
9.2.8.2	Leistungsreduzierung	371
9.2.9	Mittlere Belastung	372
9.2.10	Beispiele	372
9.2.11	Wachstumsgesetz	375
9.2.12	Auswahl und Bemessung von Antrieben	375
9.3	Elektrische Maschinen	375
9.3.1	Allgemeines	375
9.3.1.1	Grundprinzip	377
9.3.1.2	Aufbau	377
9.3.1.3	Stromwendermaschinen	378
9.3.1.4	Drehfeldmaschinen	378
9.3.2	Stromwendermaschinen	378
9.3.2.1	Gleichstrom-Nebenschlußmaschinen (GNM)	378
9.3.2.2	Gleichstrom-Reihenschlußmaschine (GRM)	387
9.3.2.3	Wechselstrom-Reihenschlußmaschine (WRM, Universalmotor)-Einsatz	389
9.3.3	Drehstrommaschinen	389
9.3.3.1	Drehfeld	389
9.3.3.2	Drehstrom-Asynchronmaschine (DAM)	390
9.3.3.3	Anlaufschaltungen	403
9.3.3.4	Gleichstrombremsung	406
9.3.3.5	Drehstrom-Synchronmaschine (SYM)	407
9.3.3.6	Schenkelpol-Synchronmaschine	414
9.3.3.7	Betrieb der Synchronmaschine	416
9.3.3.8	Stoßkurzschluß	417
9.3.3.9	Elektronisch kommutierte Maschine (EK-Motor, BL-Servoantrieb)	420
9.4	Transformatoren und Drossel	425
9.4.1	Der Transformator (Umspanner)	425
9.4.1.1	Aufgabe der Transformatoren	425
9.4.1.2	Geschichtliche Entwicklung	426
9.4.1.3	Aufbau des technischen Transformators	427
9.4.1.4	Theorie des technischen Transformators	431
9.4.1.5	Spannungsänderung (Kapp-Dreieck)	434
9.4.1.6	Verluste und Wirkungsgrad	435
9.4.1.7	Schaltgruppen	437
9.4.1.8	Parallelbetrieb von Drehstromtransformatoren	439
9.4.1.9	Drehstromtransformatoren mit unsymmetrischer Belastung	440
9.4.1.10	Einschaltstromstoß (Rush-Effekt)	443
9.4.1.11	Stoßkurzschluß	443
9.4.1.12	Stromkräfte im Transformator	444
9.4.1.13	Stoßspannungsverteilung	444
9.4.1.14	Beurteilung des Betriebszustandes durch Gasanalyse des Transformatoröls	445
9.4.2	Spartransformator	445
9.4.2.1	Allgemeines	445
9.4.2.2	Betriebsverhalten	445
9.4.3	Drosselspulen	446
9.4.3.1	Einsatzfälle	446
9.4.3.2	Betrieb	446

9.5	Spezielle elektrische Kleinmaschinen	447
9.5.1	Übersicht	447
9.5.2	Drehfeldmaschinen	448
9.5.2.1	Wechselstrom-Asynchronmaschinen (WAM)	448
9.5.2.2	Schrittmotor	452
9.5.2.3	Elektronisch kommutierte Maschinen	458
9.5.3	Stromwendermaschinen	458
9.5.3.1	Gleichstrommaschinen	458
9.5.3.2	Wechselstrom-Reihenschlußmaschine (WRM, Universalmotor)	460
9.5.4	Geschaltete Reluktanzmotoren (Switched Reluktanz, SR)	462
9.5.4.1	Aufbau und Arbeitsprinzip	462
9.5.4.2	Anwendungen	463
9.6	Sonderfragen	463
9.6.1	Erwärmung	463
9.6.1.1	Wicklung	463
9.6.1.2	Lager	464
9.6.2	Schwingungen	464
9.6.3	Aufstellung der Maschinen	467
9.6.3.1	Bauformen und Schutzarten	467
9.6.3.2	Aufstellungshöhe	468
9.6.4	Wicklungen	469
9.6.4.1	Allgemeines	469
9.6.4.2	Gleichstrom-Ankerwicklungen	469
9.6.4.3	Wechselstromwicklungen	472
9.6.4.4	Zusammenfassung	477
9.7	Messungen an Maschinen	477
9.7.1	Allgemeines	477
9.7.1.1	Widerstandsmessung	477
9.7.1.2	Wirkungsgrad	477
9.7.1.3	Belastung	478
9.7.1.4	Kennlinien	478
9.7.2	Transformatoren	478
9.7.2.1	Schaltgruppen	478
9.7.2.2	Leerlaufversuch	478
9.7.2.3	Kurzschlußversuch	479
9.7.2.4	Wirkungsgrad	479
9.7.3	Drehende Maschinen	480
9.7.3.1	Stromwendermaschinen	480
9.7.3.2	Drehfeldmaschinen	481
9.7.4	Ermittlung thermischer Werte	484
9.8	Kommunikation und Antriebsvernetzung	485
9.8.1	Übersicht	485
9.8.2	Datenaustausch	485
9.8.3	(Feld-)Bussysteme	488
9.9	Anhang	489
	Tabelle A-1: Auswahl und Bestelldaten (allgemein)	489
	Tabelle A-2: Normen und Vorschriften (Auswahl)	493
	Tabelle A-3: Klemmenbezeichnungen	494
9.10	Literatur	495

10 Erzeugung, Transport und Verteilung der elektrischen Energie 496

10.1	Allgemeine Elektrizitätswirtschaft	496
10.1.1	Energieverbrauch und Energiebedarf	496
10.1.2	Energieträger	497
10.1.2.1	Begriffe	497
10.1.2.2	Fossile Energieträger	497
10.1.2.3	Kernenergieträger	498
10.1.2.4	Regenerative Energieträger	498
10.1.2.5	Energieträger in Deutschland	498

10.1.3	Energieumwandlung	498
10.1.4	Energiebereitstellung	499
10.1.5	Wirtschaftlicher Kraftwerkseinsatz	500
10.1.5.1	Einführung	500
10.1.5.2	Lastverteilung auf zwei Kraftwerke	501
10.1.5.3	Lastverteilung im allgemeinen Fall	501
10.2	Elektrische Energieerzeugung	502
10.2.1	Wasserkraftwerke	502
10.2.1.1	Bauformen	502
10.2.1.2	Wasserturbinen	503
10.2.1.3	Aufbau und Betrieb	504
10.2.2	Dampfkraftwerke	504
10.2.2.1	Einleitung	504
10.2.2.2	Grundlagen der Thermodynamik	505
10.2.2.3	Dampfkraftwerke in einfachster Form	506
10.2.2.4	Verbesserung des Wirkungsgrades	507
10.2.3	Gasturbinen- und kombinierte Gasturbinen-Dampfkraftwerke	508
10.2.3.1	Gasturbinenkraftwerke	508
10.2.3.2	Kombikraftwerke	509
10.2.4	Kernkraftwerke	509
10.2.4.1	Einführung	509
10.2.4.2	Druckwasserreaktor	510
10.2.4.3	Siedewasserreaktor	510
10.2.5	Kraftwerksregelung	510
10.2.5.1	Notwendigkeit einer Frequenzregelung	510
10.2.5.2	Generator im Einzelbetrieb	511
10.2.5.3	Generatoren im Parallelbetrieb	511
10.2.5.4	Generatoren im Verbundbetrieb	512
10.2.6	Regenerative Erzeugung elektrischer Energie	512
10.2.6.1	Photovoltaik	512
10.2.6.2	Sonnenkollektoren	514
10.2.6.3	Windkraftwerke	516
10.2.6.4	Biomasse und Müll	518
10.2.6.5	Brennstoffzellen	519
10.3	Synchrongenerator	520
10.3.1	Aufbau und Beschreibung	520
10.3.2	Ersatzschaltbilder	520
10.4	Betriebsmittel	521
10.4.1	Freileitungen	521
10.4.1.1	Freileitungsmaste	522
10.4.1.2	Freileitungsseile	523
10.4.1.3	Seildurchhang	524
10.4.1.4	Resistanz	525
10.4.1.5	Induktivität	525
10.4.1.6	Kapazitäten von Freileitungen	528
10.4.2	Kabeltechnik	530
10.4.2.1	Aufbau, Werkstoffe	530
10.4.2.2	Kabeltypen	532
10.4.2.3	Kabeleigenschaften und ihr Nachweis	534
10.4.2.4	Kabel und Freileitung	537
10.4.3	Übertragungsverhalten von Drehstromleitungen	538
10.4.3.1	Am Ende belastete Leitung	538
10.4.3.2	Kompensation von Leitungsverlusten	540
10.4.3.3	Mehrfach belastete Leitung	540
10.4.4	Isolatoren und Armaturen	542
10.4.5	Transformatoren in der Energieübertragung	543
10.4.5.1	Rechengrößen und Ersatzschaltbilder für die symmetrischen Komponenten	543
10.4.5.2	Dreiwicklungstransformator	545
10.4.5.3	Stelltransformatoren	546

10.4.6	Meßwandler	547
10.4.6.1	Arbeitsweise	547
10.4.6.2	Stromwandler	547
10.4.6.3	Spannungswandler	548
10.4.6.4	Kenngrößen von Meßwandlern	549
10.4.7	Drosselspulen	549
10.4.7.1	Reihendrosselspulen	549
10.4.7.2	Paralleldrosselspulen	550
10.4.7.3	Sternpunktdrosselspulen	550
10.5	Schaltanlagen	551
10.5.1	Allgemeines	551
10.5.2	Aufbau von Schaltanlagen	551
10.5.2.1	Sammelschienenschaltungen	551
10.5.2.2	Felder in Schaltanlagen	552
10.5.3	Mittelspannungs-Schaltanlagen	553
10.5.4	Hochspannungs-Schaltanlagen	554
10.5.4.1	Freiluftanlagen	554
10.5.4.2	Gasisolierte Hochspannungs-Schaltanlagen	557
10.5.5	Schaltgeräte	557
10.5.5.1	Trennschalter	557
10.5.5.2	Leistungsschalter	558
10.6	Übertragung und Verteilung	561
10.6.1	Aufbau von Elektroenergienetzen	561
10.6.1.1	Übertragungsart	561
10.6.1.2	Übertragungsspannung	561
10.6.1.3	Netzform	561
10.6.2	Netznachbildungen	562
10.6.3	Methode der symmetrischen Komponenten	563
10.6.3.1	Problemstellung	563
10.6.3.2	Symmetrische Komponenten	563
10.6.3.3	Mit-, Gegen- und Nullimpedanz	564
10.6.3.4	Unsymmetrische Netznachbildung	564
10.6.4	Lastflußrechnung	565
10.6.4.1	Aufgabenstellung	565
10.6.4.2	Aufstellung der Lastflußgleichungen	565
10.6.4.3	Stromiteration	565
10.6.4.4	Newton-Raphson-Verfahren	566
10.6.4.5	Verallgemeinerung	566
10.6.5	Kurzschlußberechnung	566
10.6.5.1	Einführung	566
10.6.5.2	Dreipoliger Kurzschluß	567
10.6.5.3	Unsymmetrische Kurzschlußströme	569
10.6.5.4	Beeinflussung durch Kurzschlußströme	570
10.6.6	Sternpunktbehandlung	571
10.6.6.1	Netze mit starrer Sternpunkterdung	571
10.6.6.2	Netze mit isoliertem Sternpunkt	571
10.6.6.3	Netze mit Erdschlußkompensation	572
10.6.6.4	Netze mit niederohmiger Sternpunkterdung	573
10.7	Spannungsbeanspruchung und Isolationsbemessung	573
10.7.1	Dauerbeanspruchung durch betriebsfrequente Wechselspannung	573
10.7.2	Zeitweilige Spannungserhöhungen	573
10.7.2.1	Erdschluß	573
10.7.2.2	Spannungserhöhungen durch Laständerung	575
10.7.2.3	Resonanzen	575
10.7.3	Schaltüberspannungen	576
10.7.3.1	Transiente Erdschlußüberspannungen	576
10.7.3.2	Schalten von Betriebsmitteln	577
10.7.3.3	Kurzschlußabschaltung	578
10.7.3.4	Kenngrößen von Schaltspannungen	578

10.7.4	Blitzüberspannungen	578
10.7.4.1	Kenngrößen	578
10.7.4.2	Blitzschutz	579
10.7.5	Begrenzung von Überspannungen	580
10.7.6	Isolationskoordinaten	581
10.8	Netzstabilität	583
10.8.1	Einführung	583
10.8.2	Statische Stabilität	583
10.8.2.1	Stabilitätsgrenzen	583
10.8.2.2	Leistungsdiagramm eines Turbogenerators	584
10.8.3	Transiente Stabilität	585
10.8.3.1	Beschreibung des Phänomens	585
10.8.3.2	Betrachtung eines Beispielnetzes	585
10.8.3.3	Flächenkriterium	586
10.8.3.4	Einzugsbereich	586
10.9	Netzurückwirkungen	587
10.9.1	Einführung	587
10.9.2	Spannungsabfälle	587
10.9.3	Spannungsschwankungen	588
10.9.4	Spannungsverzerrungen	589
10.9.5	Spannungssymmetrien	590
10.10	Netzschutz	591
10.10.1	Einführung	591
10.10.2	Wirkungsweise einer Schutzeinrichtung	591
10.10.3	Kurzschlußschutz für Netze	592
10.10.3.1	Strahlennetz	592
10.10.3.2	Ringnetz	592
10.10.3.3	Maschennetz	593
10.10.4	Erdschlußschutz für Netze	594
10.10.4.1	Erdschlußmelderelais	594
10.10.4.2	Erdschlußrichtungsrelais	594
10.10.4.3	Erdschlußzwischenrelais	595
10.11	Schutz vor Gefahren des elektrischen Stromes	595
10.11.1	Begründung der Schutzmaßnahmen	595
10.11.2	Schutz gegen direktes Berühren	596
10.11.3	Schutz gegen indirektes Berühren	596
10.12	Literatur	597

11 Hochspannungstechnik 600

11.1	Die elektrischen Feldbeanspruchungen	600
11.2	Berechnung elektrostatischer Felder	601
11.2.1	Punktförmige Ladung	601
11.2.2	Mehrere Punktladungen	601
11.2.3	Das elektrostatische Feld unendlich langer gerader Linienladungen	602
11.2.4	Mehrere Linienladungen	602
11.2.5	Plattenkondensator	602
11.2.6	Geschichtete Dielektrika	602
11.2.7	Zylindrisch geschichtete Dielektrika	603
11.2.8	Spiegelung	604
11.2.9	Numerische Berechnung elektrostatischer Felder	604
11.2.10	Messung elektrostatischer Felder	604
11.2.10.1	Direkte Messung	604
11.2.10.2	Analoge Abbildung	605

11.3	Erzeugung hoher Spannungen	605
11.3.1	Wechselspannung	605
11.3.1.1	Einstufige Schaltungen (nach Fischer)	606
11.3.1.2	Kesselbauweise	606
11.3.1.3	Isolierzylinderbauweise	606
11.3.1.4	Kaskadenschaltungen	606
11.3.1.5	Resonanzschaltungen	607
11.3.2	Gleichspannung	608
11.3.2.1	Einweg-Gleichrichterschaltung	608
11.3.2.2	Elektrostatische Generatoren	609
11.3.2.3	Van-de-Graaff-Bandgenerator	609
11.3.3	Stoß-Spannung	609
11.3.3.1	Erzeugung von Stoß-Spannungen	609
11.4	Messung hoher Spannungen	610
11.4.1	Kugelfunkenstrecke	610
11.4.2	Spannungsteiler	611
11.4.2.1	Ohmscher Spannungsteiler	611
11.4.2.2	Kapazitiver Spannungsteiler	612
11.4.3	Spannungswandler	612
11.4.4	Elektrostatische Spannungsmesser	613
11.4.5	Rotorspannungsmesser; Schwingungsspannungsmesser	613
11.4.6	Scheitelwertmessung	614
11.5	Das Verhalten der Isolierstoffe im elektrischen Feld	614
11.6	Gasförmige Isolierstoffe	616
11.6.1	Leitung in Gasen	616
11.6.2	Durchschlag in Gasen	616
11.6.2.1	Lawinendurchschlag	616
11.6.2.2	Kanaldurchschlag (Streamerdurchschlag)	617
11.6.2.3	Koronaentladungen	617
11.6.2.4	Einflußfaktoren auf die elektrische Festigkeit von Gasen	618
11.6.2.5	Anwendungen	618
11.7	Flüssige Isolierstoffe	618
11.7.1	Leitung in flüssigen Isolierstoffen	619
11.7.2	Durchschlagsmechanismen in Flüssigkeiten	620
11.7.2.1	Einflüsse auf die Durchschlagfestigkeit von Flüssigkeiten	620
11.7.3	Anwendungen	620
11.8	Feste Isolierstoffe	620
11.8.1	Leitung in festen Isolierstoffen	620
11.8.2	Durchschlag in festen Isolierstoffen	621
11.8.2.1	Abhängigkeit von äußeren Einflüssen	622
11.8.3	Anwendungen	622
11.9	Dimensionierung von Isolierungen	622
11.10	Hochspannungsprüfungen	623
11.10.1	Messung der elektrischen Festigkeit	623
11.10.2	Messung des Isolationswiderstandes	623
11.10.3	Kapazitäts- und Verlustfaktor-Messung	623
11.10.4	Teilentladungsmessung	624
11.10.5	Kriechstromfestigkeit, Lichtbogenfestigkeit	624
11.10.6	Alterungsmessung, Isolationsdiagnostik	624
11.11	Literatur	625

12 Automatisierungstechnik 626

12.1	Steuerungstechnik	626
12.1.1	Begriffsklärung	626
12.1.2	Definition des Automaten, des Automatisierungsbereiches und des Automatisierungsgrades nach DIN 19233	627
12.1.3	Elemente der Automatisierungstechnik	627

12.1.4	Steuern und Regeln	628
12.1.4.1	Begriffsklärung Steuerung	628
12.1.4.2	Begriffsklärung Regelung	628
12.1.5	Definition der Begriffe Steuern, Steuerungen, Regeln und Regelungen nach DIN 19226	629
12.1.6	Grundbegriffe der Steuerungstechnik	629
12.1.6.1	Die Komponenten der Steuerungstechnik	629
12.1.6.2	Die Signalerfassung (Sensorik)	630
12.1.6.3	Die Signalverarbeitung	630
12.1.6.4	Die Signalausgabe (Aktorik)	630
12.1.6.5	Die wichtigsten Signalgeber der Steuerungstechnik	631
12.1.6.6	Die wichtigsten Stellgeräte der Steuerungstechnik	631
12.1.6.7	Leistungstransistoren	632
12.1.6.8	Zusammenfassung	632
12.1.7	Schaltzeichen der Steuerungstechnik	632
12.1.7.1	Schaltpläne	634
12.1.7.2	Schaltzeichen	634
12.1.8	Die Steuerungsarten	640
12.1.8.1	Historischer Überblick	640
12.1.8.2	Klassifizierung der Steuerungen	642
12.1.8.3	Synchrone, asynchrone und verknüpfungsorientierte Signalverarbeitung	645
12.1.8.4	Die Führungssteuerung	645
12.1.8.5	Die Haltegliedsteuerung als Befehlsspeicher	645
12.1.8.6	Programmsteuerungen als Ablaufsteuerungen	645
12.1.9	Speicherprogrammierbare Steuerungen (SPS)	646
12.1.9.1	Einleitung	646
12.1.9.2	Die Begriffe SPS und VPS im Vergleich	646
12.1.9.3	Die Vorteile von SPS-Systemen	648
12.1.9.4	Die Programmerstellung in einer Programmier-Fachsprache	649
12.1.9.5	Die Inbetriebnahme eines Programmes	651
12.1.9.6	Die Dokumentation des Programmes	653
12.1.9.7	Der Aufbau eines SPS-Systems	655
12.1.9.8	Die Signalerfassung mit INPUT-Baugruppen	655
12.1.9.9	Der prinzipielle Aufbau einer Zentralbaugruppe	656
12.1.9.10	Die Verarbeitung innerhalb des Bit-Prozessors	657
12.1.9.11	Die Signalausgabe mit OUTPUT-Baugruppen	658
12.1.9.12	Die Programmerstellung und -bearbeitung in der SPS	658
12.1.9.13	Die serielle Programmbearbeitung in der SPS	659
12.1.9.14	Die strukturierte Programmbearbeitung in der SPS	659
12.1.9.15	Die Erstellung eines modularen Programmes mit Parameterübergabe aus dem Hauptprogramm	659
12.1.9.16	Betrachtungen zu Programmzykluszeiten und Reaktionszeiten in SPS-Systemen – Definitionen	661
12.1.9.17	Betrachtungen zur zeitlichen Bearbeitung des Anwenderprogrammes	661
12.1.10	Die Programmierung von Grundfunktionen der Steuerungstechnik	661
12.1.10.1	Allgemeines	661
12.1.10.2	Die Programmierung der Grundfunktionen	673
12.1.10.3	Die binären Grundfunktionen	673
12.1.10.4	Zusammengesetzte binäre Grundfunktionen	674
12.1.10.5	Die binäre Zuweisungsfunktion	675
12.1.10.6	Die Selbsthaltung mit vorher zugewiesenen Ausgängen oder Merkern	676
12.1.10.7	Die RS-Flipflop-Funktion zur Speicherung binärer Ergebnisse	676
12.1.10.8	Die Erkennung eines Signalwechsels am Eingang (Flanke)	677
12.1.10.9	Die Vorgabe von Zahlenwerten und Parametern – die Befehle Laden und Transferieren –	678
12.1.10.10	Die Programmierung von Zählern	679
12.1.10.11	Die Programmierung von Zeitfunktionen	680
12.1.10.12	Die Darstellung der Zeit im Format KT	680
12.1.10.13	Die allgemeine Darstellung eines Zeitgliedes	680
12.1.10.14	Das Starten einer Zeit als Impuls (SI)	680
12.1.10.15	Das Starten einer Zeit als verlängerter Impuls (SV)	681

12.1.10.16	Das Starten einer Zeit als Einschaltverzögerung (SE)	681
12.1.10.17	Das Starten einer Zeit als speichernde Einschaltverzögerung (SS)	682
12.1.10.18	Das Starten einer Zeit als Ausschaltverzögerung (SA)	682
12.1.11	Die digitalen Grundfunktionen im Bereich der Funktionsbausteine	682
12.1.11.1	Digitale Verknüpfungen im 16-Bit-Wortbereich	682
12.1.11.2	Die Akku-Schiebefunktionen	683
12.1.11.3	Die organisatorischen Funktionen	683
12.1.11.4	Die Sprungbefehle und Bausteinendbefehle	683
12.1.11.5	Die Programmstrukturierung mittels Organisationsbausteinen	685
12.1.11.6	Die Behandlung der analogen Peripherie	685
12.1.12	Die Zusammenstellung aller STEP 5 Operationen des Systems 115U	687
12.1.13	Zusammenfassung und Ausblick	688
12.2	Regelungstechnik	688
12.2.1	Allgemeines	688
12.2.2	Übertragungsglieder	690
12.2.2.1	Eigenschaften der Übertragungsglieder	690
12.2.2.2	Kennfunktionen linearer, elementarer Übertragungsglieder	690
12.2.2.3	Das Zusammenschalten linearer Übertragungsglieder	697
12.2.2.4	Nichtlineare Übertragungsglieder	698
12.2.3	Regelstrecken	698
12.2.3.1	Beschreibung linearer Strecken im Frequenzbereich	698
12.2.3.2	Approximation linearer Regelstrecken	699
12.2.3.3	Beschreibung linearer Regelstrecken im Zustandsraum	702
12.2.4	Regler	703
12.2.4.1	Kontinuierliche (analoge) Regler	703
12.2.4.2	Zustandsregler	706
12.2.5	Lineare kontinuierliche Regelungen	707
12.2.5.1	Übertragungsverhalten des Regelkreises	707
12.2.5.2	Stabilitätskriterien für Regelkreise	707
12.2.5.3	Entwurfsverfahren für einschleifige Regelkreise	709
12.2.5.4	Kriterien zur Reglerauswahl	714
12.2.5.5	Entwurfsverfahren für mehrschleifige Regelkreise	714
12.2.6	Lineare digitale Abtastregelungen	716
12.2.6.1	Beschreibung diskontinuierlicher Signale	716
12.2.6.2	z-Übertragungsfunktion linearer Systeme	717
12.2.6.3	Stabilität digitaler Abtastsysteme	719
12.2.6.4	Regelalgorithmen für digitale Abtastregelungen	719
12.2.6.5	Entwurfsverfahren für digitale Abtastregelungen	721
12.2.7	Nichtlineare Regelungen	723
12.2.7.1	Unstetige nichtlineare Übertragungsglieder	726
12.2.7.2	Regelkreise mit nichtlinearen Reglern	726
12.2.7.3	Stabilität nichtlinearer Regelungen	730
12.2.8	Adaptive Regelungen	731
12.2.8.1	Identifikationsverfahren	732
12.2.8.2	Entscheidungs- und Modifikationsverfahren	733
12.2.9	Regelungen an Gleichstromantrieben	734
12.2.10	Regelungen an Drehstromantrieben	737
12.2.10.1	Drehzahlregelung an Asynchronmaschinen mit Kurzschlußläufer	737
12.2.10.2	Drehzahlregelung an Asynchronmaschinen mit Schleifringläufer (untersynchrone Stromrichteraskade)	740
12.2.10.3	Drehzahlregelung am Stromrichtermotor	741
12.2.11	Regelung, Steuerung und Programmierung von Industrierobotern	741
12.2.11.1	Aufgabenstellung und Modellbildung	741
12.2.11.2	Antriebskonzept	743
12.2.11.3	Sensorik	743
12.2.11.4	Regelungskonzepte	744
12.2.11.5	Programmierung von Industrierobotern	746
12.2.11.6	Programmiersysteme für Industrieroboter	747
12.2.11.7	Steuerungen für Industrieroboter	748

12.2.12	Fuzzy Regelung	748
12.2.12.1	Unschärfe Mengen (Fuzzy-Mengen) und ihre Verknüpfungen	748
12.2.12.2	Struktur eines Fuzzy-Reglers	750
12.2.12.3	Entwurf eines Fuzzy-Reglers	751
12.2.12.4	Übertragungsverhalten von Fuzzy-Reglern	752
12.3	Literatur	752

13 Elektrowärme 755

13.1	Allgemeine Grundlagen	755
13.1.1	Definitionen	755
13.1.1.1	Wärme, Temperatur	755
13.1.1.2	Elektrowärme	755
13.1.1.3	Mittelbare und unmittelbare Erwärmung	755
13.1.1.4	Direkte und indirekte Erwärmung	755
13.1.2	Wärmeübertragung	755
13.1.2.1	Wärmeleitung	755
13.1.2.2	Konvektion	757
13.1.2.3	Wärmedurchgang	759
13.1.2.4	Wärmestrahlung	759
13.1.3	Erwärmungs- und Abkühlungsvorgänge	761
13.2	Widerstandserwärmung	762
13.2.1	Unmittelbare Widerstandserwärmung	762
13.2.1.1	Erwärmung elektrisch leitender Materialien im direkten Stromdurchgang	762
13.2.1.2	Erwärmung von Elektrolyten	763
13.2.2	Mittelbare Widerstandserwärmung	765
13.2.2.1	Ofentypen und Ofenaufbau	765
13.2.2.2	Wandmaterialien	765
13.2.2.3	Heizelemente	766
13.3	Induktionserwärmung	767
13.3.1	Theorie der induktiven Erwärmung	767
13.3.2	Induktions-Schmelzöfen	768
13.3.2.1	Induktions-Rinnenöfen	769
13.3.2.2	Induktions-Tiegelöfen	770
13.4	Lichtbogenerwärmung	772
13.4.1	Arten der Lichtbogenerwärmung	772
13.4.2	Lichtbogenstahlschmelzöfen	772
13.4.2.1	Allgemeines	772
13.4.2.2	Aufbau des Drehstrom-Lichtbogenofens und seine Symmetrierung	773
13.4.2.3	Arbeitsablauf in einem Lichtbogenofen und das Verhalten des Lichtbogens	775
13.4.2.4	Ersatzschaltbild des Drehstrom-Lichtbogenofens	775
13.4.2.5	Optimale elektrische Anpassung	776
13.5	Dielektrische Erwärmung und Mikrowellenerwärmung	778
13.5.1	Dielektrische Erwärmung	778
13.5.2	Mikrowellenerwärmung	779
13.6	Literatur	780

Sachwortverzeichnis 781