

# Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der Beispiele .....	XVI
<b>1 Grundbegriffe .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Normen, DIN, VDE .....</b>	<b>1</b>
<b>1.2 Elektrische Ladung .....</b>	<b>1</b>
1.2.1 Erklärung, Einheit und Elementarladung .....	1
1.2.2 Eigenschaften von Ladungen .....	2
<b>1.3 Elektrische Spannung .....</b>	<b>2</b>
1.3.1 Erklärung und Einheit .....	2
1.3.2 Definition der elektrischen Spannung .....	2
1.3.3 Polarität .....	3
1.3.4 Spannungsarten .....	3
1.3.5 Periodendauer und Frequenz .....	3
<b>1.4 Elektrischer Strom .....</b>	<b>4</b>
1.4.1 Erklärung und Einheit .....	4
1.4.2 Definition des elektrischen Stromes .....	4
1.4.3 Eigenschaften des elektrischen Stromes .....	4
<b>1.5 Elektrische Leistung und Arbeit .....</b>	<b>5</b>
<b>1.6 Elektrischer Widerstand .....</b>	<b>5</b>
1.6.1 Erklärung und Schaltzeichen .....	5
1.6.2 Definitionen .....	5
1.6.3 Einheiten .....	5
1.6.4 Materialien .....	6
1.6.5 Berechnung des Widerstandsbetrags .....	6
1.6.6 Temperaturverhalten von Widerständen .....	7
1.6.7 Supraleitfähigkeit .....	7
<b>1.7 Das Ohmsche Gesetz .....</b>	<b>8</b>
<b>1.8 Nenndaten .....</b>	<b>9</b>
<b>2 Komponenten elektrischer Anlagen .....</b>	<b>10</b>
<b>2.1 Verbindungselemente .....</b>	<b>10</b>
<b>2.2 Stromwege .....</b>	<b>10</b>
2.2.1 Erklärung .....	10
2.2.2 Belastbarkeit .....	10
2.2.3 Stromdichte .....	12
2.2.4 Einfluß auf die Berechnung .....	12
<b>2.3 Überstrom- und Fehlerstrom-Schutzeinrichtungen .....</b>	<b>12</b>
2.3.1 Erklärung .....	12
2.3.2 Sicherungen .....	13
2.3.3 Schutzschalter (Automaten) .....	14
2.3.4 Vergleich: Sicherung — Schutzschalter .....	15
2.3.5 Einfluß auf die Stromkreisberechnung .....	16

<b>2.4</b>	<b>Schalter</b>	16
2.4.1	Schalterkategorien	16
2.4.2	Kontakte	16
2.4.3	Große Schaltleistungen	17
2.4.4	Einfluß auf die Berechnung	17
<b>2.5</b>	<b>Spulen</b>	18
2.5.1	Erklärung und Schaltzeichen	18
2.5.2	Einfluß auf die Berechnung	18
<b>2.6</b>	<b>Kondensatoren</b>	18
2.6.1	Erklärung und Schaltzeichen	19
2.6.2	Einfluß auf die Berechnung	19
<b>2.7</b>	<b>Halbleiterbauelemente</b>	19
2.7.1	Erklärung	19
2.7.2	Leitungsmechanismen bei Halbleitern	19
2.7.3	p-n-Übergänge	21
2.7.4	Dioden und Sperrschichten	23
2.7.5	Transistoren	24
2.7.6	Thyristor	26
2.7.7	Triac	27
2.7.8	Diac	27
2.7.9	Zusammenfassung der Sperrschichtbauelemente	28
2.7.10	Einfluß auf die Berechnung	28
<b>2.8</b>	<b>Meßgeräte mit Zeigern und Ziffern</b>	28
2.8.1	Allgemeines	28
2.8.2	Technische Daten	30
2.8.2.1	Klassengenauigkeit	30
2.8.2.2	Innenwiderstand	30
2.8.2.3	Empfindlichkeit	30
2.8.2.4	Die wichtigsten Meßschaltungen	31
2.8.2.5	Skalenauswertung	31
2.8.2.6	Einfluß auf die Berechnung	32
<b>2.9</b>	<b>Oszilloskop</b>	32
2.9.1	Erklärung	32
2.9.2	Meßmöglichkeiten	32
2.9.3	Auswertung	32
2.9.4	Einfluß auf die Berechnung	33
<b>2.10</b>	<b>Quellen</b>	33
2.10.1	Generatoren	34
2.10.2	Galvanische Elemente	34
2.10.3	Sonnenzellen	34
2.10.4	Schadquellen	35
2.10.5	Einfluß auf die Berechnung	35
<b>3</b>	<b>Elektrische Stromkreise</b>	36
3.1	Erklärung	36
3.2	Das Ersatzschaltbild	36
3.3	Technischer Stromrichtungssinn	37
3.4	Erzeuger-, Speicher- und Verbraucher-Kriterium	37

<b>4</b>	<b>Gleichstromkreise mit linearen Komponenten</b>	<b>38</b>
4.1	Erklärung	38
4.2	Reihenschaltung	38
4.2.1	Ersatzwiderstand	38
4.2.2	Strom	38
4.2.3	Teilspannungen; Spannungsabfälle	39
4.2.4	Verallgemeinerung	39
4.2.5	Klemmenspannung	39
4.3	Parallelschaltung	51
4.3.1	Spannungen	51
4.3.2	Ströme	51
4.3.3	Stromverhältnisse	52
4.3.4	Stromaufteilung	52
4.3.5	Ersatzwiderstands-Berechnung	52
4.3.6	Verallgemeinerung	53
4.4	Gemischte Schaltungen	56
4.4.1	Gemischte Schaltungen mit einer Quelle	56
4.4.2	Wheatstonesche Meßbrücke; $R$ -Messung; Druckaufnehmer	63
4.4.3	Gemischte Schaltungen mit mehreren Quellen	64
4.4.3.1	Helmholtzscher Überlagerungssatz	65
4.4.3.2	Maschenmethode	66
<b>5</b>	<b>Gleichstromkreise mit nichtlinearen Komponenten</b>	<b>70</b>
5.1	Reihenschaltungen nichtlinear	71
5.1.1	Linear-nichtlinear gemischte Schaltungen	71
5.1.2	Rein nichtlineare Reihenschaltungen	73
5.2	Parallelschaltungen nichtlinear	73
5.3	Gemischte Schaltungen nichtlinear	73
<b>6</b>	<b>Felder</b>	<b>77</b>
6.1	Allgemeines	77
6.2	Grundgrößen und Richtungsnormen	77
6.2.1	Ausgangsgröße und Repräsentant des Feldes	77
6.2.2	Typische Feldbilder; Spulenfluß $\psi$	78
6.2.3	Polaritäten	78
6.3	Felddichte	79
6.4	Feldstärke	79
6.5	Feldkonstante	80
6.6	Verknüpfungen	81
6.7	Ohmsches Gesetz	81
6.8	Kapazität und Induktivität	82
6.9	Ladestrom und Induktionsvorgang	83
6.10	Schaltungen von Kondensatoren	83
6.10.1	Reihenschaltungen von Kondensatoren	83
6.10.2	Parallelschaltung von Kondensatoren	84
6.11	Schaltungen von Spulen	85
6.11.1	Reihenschaltung von Spulen	85
6.11.2	Parallelschaltung von Spulen	85

6.12	Schaltvorgänge	86
6.13	Zeitkonstante	87
6.14	Induktionsvorgänge	88
6.15	Kräfte im magnetischen Feld	97
6.15.1	Kräfte zwischen magnetischen Polen mit Eisenkern	97
6.15.2	Stromkräfte im Magnetfeld	98
6.15.3	Magnetische Kräfte zwischen zwei Strömen	98
7	Wechselstromkreise	100
7.1	Allgemeines	100
7.2	Darstellungsarten, Formalien und Vereinbarungen	100
7.2.1	Liniendiagramm und mathematische Beschreibung	100
7.2.2	Zeigerdiagramm	101
7.2.3	Phasenlage	101
7.2.4	Rechnen mit Zeigern	102
7.2.5	Zählpfeile	103
7.3	Wechselstromleistung; Effektivwert	103
7.3.1	Allgemeines	103
7.3.2	Wechselstromenergie; mittlere Leistung	104
7.3.3	Effektivwert der Wechselstromgrößen	104
7.4	Wechselstromverbraucher einzeln	105
7.4.1	Rein ohmscher Verbraucher; Wirkwiderstand	105
7.4.2	Blindwiderstände; Reaktanzen	106
7.5	Wechselstromverbraucher in Reihe	107
7.6	Wechselstromverbraucher in Parallelschaltung	114
7.7	Wechselstromverbraucher in gemischter Schaltung	115
7.8	Wirk-, Blind- und Scheinleistung; graphische Darstellung	117
7.9	Wirk-, Blind- und Scheinleistung; rechnerische Behandlung	118
7.10	Blindleistungskompensation	121
7.11	Spannungsabfall auf elektrischen Stromwegen	123
7.12	Drosselpulen	124
7.12.1	Erklärung	124
7.12.2	Transformatoren-Hauptgleichung	125
7.13	Einschaltvorgänge bei Drosselpulen	129
7.13.1	Einschalten im Spannungsmaximum	129
7.13.2	Einschalten im Spannungsnulldurchgang; Rusheffekt	129
8	Dreiphasenwechselstrom (Drehstrom)	131
8.1	Entstehung; Allgemeines	131
8.2	Schaltungen allgemein	132
8.3	Sternschaltung (Y-Schaltung)	132
8.3.1	Spannungen	132
8.3.2	Ströme	132
8.3.2.1	Ströme bei symmetrischer Belastung	133
8.3.2.2	Ströme bei unsymmetrischer Belastung	133
8.4	Dreieckschaltung ( $\Delta$ -Schaltung)	133
8.4.1	Spannungen	133
8.4.2	Ströme	134

8.5	Netzstromvergleich zwischen Y- und $\Delta$ -Schaltung	134
8.6	Drehstromleistung	135
8.6.1	Quantitative Betrachtung	135
8.6.2	Qualitative Betrachtung	136
8.7	Zulässige Schaltungen	137
8.8	Spannungsabfall bei Drehstrom	138
8.9	Die wichtigsten Schutzmaßnahmen nach DIN 57100/VDE 0100	139
8.9.1	Nullung	139
8.9.2	Schutzisolierung	141
8.9.3	Fehlerstromschutzschalter	141
8.9.4	Vergleich der Schutzmaßnahmen; Vor- und Nachteile	141
8.10	Blindleistungskompensation bei Drehstromanlagen	144
9	Transformator (Trafo, Umspanner)	147
9.1	Aufgabe, Aufbau und Bauformen	147
9.2	Wirkungsweise	147
9.3	Übersetzung	148
9.4	Belastung	148
9.5	Kenndaten	148
9.6	Kurzschluß	149
9.7	Spannungsabfall bei Belastung	149
9.8	Spezielle Aufgabenstellungen von Trafos	152
10	Stromrichter	153
10.1	Erklärung	153
10.2	Gleichrichter	153
10.3	Wechselrichter	154
10.4	Umrichter	156
10.4.1	Direktumrichter	156
10.4.2	Zwischenkreisumrichter	156
11	Elektrische Maschinen allgemein	157
11.1	Übersicht über die einzelnen Maschinenarten	157
11.2	Mechanische Gemeinsamkeiten bei elektrischen Maschinen	158
11.2.1	Baugruppen an Maschinen	158
11.2.2	Bauformen	158
11.2.3	Schutzarten	158
11.2.4	Lager	159
11.2.5	Wellenenden	160
11.2.6	Kühlung	160
11.2.6.1	Oberflächengekühlte Maschinen	161
11.2.6.2	Innengekühlte Maschinen	161
11.2.6.3	Maschinen mit Konvektionskühlung	161
11.2.6.4	Maschinen mit Fremdkühlung	161
11.2.7	Material der aktiven Teile	162
11.2.7.1	Ständer- und Läuferisen	162
11.2.7.2	Wicklungen	162

11.2.8	Normmotoren	163
11.2.9	Explosionssgeschützte Maschinen	164
<b>11.3</b>	<b>Gemeinsamkeiten bei Motorkennlinien</b>	<b>166</b>
11.3.1	Betriebsdrehzahl	166
11.3.2	Drehzahlstabilität	167
11.3.3	Drehzahlcharakteristiken	167
<b>11.4</b>	<b>Elektrische Gemeinsamkeiten</b>	<b>168</b>
11.4.1	Leistungsschild	168
11.4.2	Genormte Spannungen	168
11.4.3	Leistungsbilanz	169
11.4.4	Leistungsverluste	170
11.4.4.1	Reibungsverluste	170
11.4.4.2	Eisenverluste	170
11.4.4.3	Kupferverluste	171
11.4.4.4	Beurteilung der Verluste	171
11.4.5	Drehmomentbildung	172
11.4.5.1	Stromwendermaschinenfall	172
11.4.5.2	Asynchronmaschinenfall	172
11.4.5.3	Synchronmaschinenfall	172
11.4.6	Quadrantenbegriffe	173
11.4.7	Generatorbetrieb	174
11.4.8	Pendelmaschine (Drehmomentwaage)	174
<b>11.5</b>	<b>Gemeinsamkeiten bei Fehlbedienung</b>	<b>175</b>
<b>12</b>	<b>Gemeinsamkeiten bei Drehfeldmaschinen</b>	<b>177</b>
<b>12.1</b>	<b>Drehfelder</b>	<b>177</b>
12.1.1	Erklärung	177
12.1.2	Dreiphasiges Drehfeld	177
12.1.2.1	Dreiphasig zweipoliges Drehfeld	177
12.1.2.2	Dreiphasig vierpoliges Drehfeld	178
12.1.3	Beziehung zwischen Dreh- und Wechselfeldern	179
<b>12.2</b>	<b>Ständerwicklungen von Drehfeldmaschinen</b>	<b>179</b>
12.2.1	Zweipoliges Drehfeld in sechs Nuten	179
12.2.2	Zweipoliges Drehfeld in zwölf Nuten	180
12.2.3	Vierpoliges Drehfeld in zwölf Nuten	181
<b>12.3</b>	<b>Umsteuern von Drehfeldmaschinen</b>	<b>181</b>
<b>12.4</b>	<b>Wanderfeld</b>	<b>141</b>
<b>13</b>	<b>Asynchronmaschine (Induktionsmaschine)</b>	<b>183</b>
<b>13.1</b>	<b>Konstruktive Abgrenzung</b>	<b>183</b>
13.1.1	Ständer	183
13.1.1.1	Drehstromausführung	183
13.1.1.2	Konische Ständerausführung (Bremsmotor)	183
13.1.1.3	Einphasenausführung (Kondensatormotor)	184
13.1.1.4	Spaltpolmotor	186
13.1.2	Luftspalt	186
13.1.3	Läufer	186
13.1.3.1	Schleifringläufer	186
13.1.3.2	Kurzschluß- oder Käfigläufer	187

<b>13.2 Wirkungsweise der Asynchronmaschine</b>	191
13.2.1 Drehmomentbildung	191
13.2.2 Drehzahlbereiche	192
13.2.3 Schlupf	192
13.2.4 Leistungsbilanz der Asynchronmaschine	193
13.2.5 Kreisdiagramm der Asynchronmaschine	194
13.2.6 Betriebskennlinien der Asynchronmaschine	197
13.2.7 Besonderheiten beim Schleifringläufer	200
13.2.7.1 Transformatorbetrieb	200
13.2.7.2 Periodenumformer (Frequenzwandler)	200
13.2.7.3 Elektrische Welle (Ferndreherwelle)	203
13.2.7.4 Läuferereinspeisung	203
<b>13.3 Anlauf der Asynchronmaschine</b>	203
13.3.1 Auswirkungen	203
13.3.1.1 Problem aus der Sicht des Motors	204
13.3.1.2 Problem aus der Sicht der Arbeitsmaschine	204
13.3.1.3 Problem aus der Sicht des Netzes	204
13.3.2 Anlaufhilfen	205
13.3.2.1 Spannungsherabsetzung am Ständer	205
13.3.2.2 Y-Δ-Anlaufverfahren	206
13.3.2.3 Anlauf bei kleinerer Drehzahl	209
13.3.2.4 Spezielle Maschinen	209
13.3.2.5 Schleifringläufer	210
13.3.2.6 Schaltkupplungen	211
13.3.2.7 Sonstige Methoden	212
<b>13.4 Drehzahlsteuerung von Asynchronmaschinen</b>	212
13.4.1 Frequenzsteuerung; Stellgröße: $f_1$	213
13.4.2 Polumschaltung; Stellgröße: $p$	214
13.4.3 Drehfeldsteuerung; Stellgröße: $\Phi_D$	215
13.4.4 Schleifringläufervorwiderstände; Stellgröße: Vorwiderstand $R_V$	216
<b>13.5 Bremsen der Asynchronmaschine</b>	218
13.5.1 Bremsen durch Drehzahlverstellung	218
13.5.2 Gegenstrombremsen	218
13.5.3 Gleichstrombremsung	218
<b>13.6 Vom Nennbetrieb abweichende Betriebsdaten</b>	219
13.6.1 Abweichende Spannung	219
13.6.1.1 Zu hohe Betriebsspannung	219
13.6.1.2 Zu niedrige Betriebsspannung	220
13.6.2 Abweichende Netzfrequenz	220
13.6.2.1 Zu hohe Frequenz	220
13.6.2.2 Zu niedrige Frequenz	220
<b>14 Synchronmaschine</b>	228
<b>14.1 Konstruktive Abgrenzung</b>	228
14.1.1 Ständerkonstruktionen	229
14.1.1.1 Turbo-Ständer	229
14.1.1.2 Schenkelpol-Ständer	230
14.1.1.3 Klauenpol-Ständer	230
14.1.2 Luftspalt	231
14.1.3 Läuferkonstruktionen	231
14.1.3.1 Turbo-Läufer (Vollpol-Läufer)	232

14.1.3.2	Schenkelpol-Läufer	233
14.1.3.3	Klauenpol-Läufer	233
14.1.3.4	Dämpferwicklung	233
14.2	Wirkungsweise der Synchronmaschine	234
14.2.1	Generator	234
14.2.1.1	Leerlauf	234
14.2.1.2	Belastung	235
14.2.2	Motor	235
14.2.2.1	Leerlauf; Anlauf	235
14.2.2.2	Belastung des Synchronmotors	236
14.2.2.3	Abbremsen eines Synchronmotors	238
14.3	Phasenschieberbetrieb	238
14.4	Generator-Inbetriebnahme; Synchronisierung	239
15	Gemeinsamkeiten bei Stromwendermaschinen	245
15.1	Ständer von Stromwendermaschinen	245
15.1.1	Maschinen mit ausgeprägten Polen	245
15.1.2	Maschinen mit verteilter Ständerwicklung	246
15.2	Läufer von Stromwendermaschinen	246
15.3	Ankerwicklungen bei Stromwendermaschinen	248
15.4	Ankerrückwirkung	251
15.5	Schaltungen und Klemmenbezeichnungen von Stromwendermaschinen	251
15.6	Umsteuern von Stromwendermaschinen	252
16	Gleichstrommaschine	253
16.1	Erklärung und Aufbau	253
16.2	Wirkungsweise	255
16.2.1	Generator	255
16.2.1.1	Tachogenerator	255
16.2.1.2	Bordnetzgenerator	256
16.2.1.3	Erregergenerator	256
16.2.1.4	Leonardgenerator	256
16.2.1.5	Innere Motor-Gegenspannung	257
16.2.2	Motor	258
16.3	Betrieb	258
16.3.1	Ankerstrom	258
16.3.1.1	Fremd- und Nebenschlußerregung	258
16.3.1.2	Reihen- oder Hauptschlußerregung	259
16.3.2	Drehzahlverstellung	260
16.3.2.1	Fremderregte Gleichstrommaschine	260
16.3.2.2	Nebenschlußerregte Gleichstrommaschine	262
16.3.2.3	Reihenschlußerregte Maschine	263
16.3.2.4	Doppelschlußerregte Gleichstrommaschine	264
16.3.3	Bremsen der Gleichstrommaschine	265
17	Wechselstrom-Stromwendermaschine	270
17.1	Erklärung	270
17.2	Wirkungsweise	271

17.2.1	Drehmomentbildung	271
17.2.1.1	Universal- und Lokomotivmotor	271
17.2.1.2	Repulsionsmotor	272
17.2.2	Stromwendung bei Einphasenwechselstrommaschinen	273
<b>18</b>	<b>Drehstrom-Stromwendermaschine</b>	<b>275</b>
18.1	Läufergespeister Drehstromnebenschlußmotor (LDNM)	275
18.1.1	Aufbau des LDNM	276
18.1.1.1	Läufer	276
18.1.1.2	Ständer	276
18.1.2	Wirkungsweise des LDNM	277
18.1.3	Betriebseigenschaften	277
18.1.4	Typische Anwendungsgebiete des LDNM	277
18.2	Sonstige Drehstrom-Stromwendermaschinen	278
<b>19</b>	<b>Mechanik des elektrischen Antriebs</b>	<b>279</b>
19.1	Typische Lastkennlinien der Arbeitsmaschinen	279
19.2	Typische Antriebskennlinien	279
19.3	Trägheitsmoment	280
19.4	Beschleunigungsmoment	281
19.5	Anfahrzeit	281
<b>20</b>	<b>Thermik der elektrischen Maschine</b>	<b>283</b>
20.1	Nennleistung	283
20.1.1	Konstante Betriebsdaten	284
20.1.2	Schwankende Betriebsdaten	284
20.2	Betriebsarten	286
20.2.1	Belastungs-Leistungs-Kurve	286
20.2.2	Temperaturverlaufs-Kurve	286
20.3	Besondere Betriebsbedingungen	288
<b>21</b>	<b>Steuerungen</b>	<b>290</b>
21.1	Erklärung, Aufgaben, Ziele	290
21.2	Komponenten elektrischer Steuerungen	292
21.2.1	Taster	293
21.2.2	Schütze	293
21.2.2.1	Leistungsschütze	293
21.2.2.2	Hilfsschütze	294
21.2.2.3	Zeitrelais	294
21.3	Schaltpläne	295
21.4	Systematik der Stromlaufplanerstellung	296
<b>22</b>	<b>Steuerungen durch mikroelektronische Baugruppen</b>	<b>302</b>
<b>23</b>	<b>Sicherheit elektrischer Anlagen</b>	<b>304</b>
	Literaturangaben	306
	Sachwortverzeichnis	307