

<b>Vorwort</b> .....	5
<b>Die Autoren</b> .....	6
<b>1 Einführung in die Leistungselektronik</b> .....	17
1.1 Entwicklungsstationen .....	17
1.2 Grundprinzip der Stromrichter .....	19
1.2.1 Blockschaltbilder .....	19
1.2.1.1 Gleichrichter .....	19
1.2.1.2 Wechselrichter .....	19
1.2.1.3 Umrichter .....	20
1.2.2 Lastarten .....	21
1.2.2.1 Passive Verbraucher .....	21
1.2.2.2 Aktive Verbraucher .....	21
1.2.3 Stromrichterventile .....	21
1.2.3.1 Ungesteuerte Ventile – Dioden .....	22
1.2.3.2 Gesteuerte Ventile – Thyristoren .....	22
1.3 Grundlagen der Steuerungstechnik .....	22
1.3.1 Grundbegriffe .....	22
1.3.2 Steuerungsarten .....	26
1.3.2.1 Führungssteuerung .....	26
1.3.2.2 Haltegliedsteuerung .....	26
1.3.2.3 Programmsteuerung .....	28
1.3.2.4 Speicherprogrammierte Steuerung .....	30
1.3.3 Stellglieder .....	32
1.4 Grundlagen der Regelungstechnik .....	34
1.4.1 Grundbegriffe .....	34
1.4.2 Verhalten eines Regelkreises .....	36
1.4.2.1 Störverhalten bei Festwertregelung .....	39
1.4.2.2 Führungsverhalten bei Folgeregelung .....	40
1.4.3 Verhalten von Regelkreisgliedern .....	41
1.4.3.1 Systeme mit zwei Energiespeichern .....	46
1.4.4 Operationsverstärker als Regler .....	47
1.4.4.1 Beispiel mit OP als P-Regler .....	47
1.4.4.2 I-Regler mit OP .....	51
1.4.4.3 PI-Regler mit OP .....	54
1.4.4.4 Vermaschte Regelkreise .....	55
1.4.4.5 PID-Regler mit OP .....	57
1.4.5 Regelungstechnische Anwendungen .....	58
1.5 Formelzeichen .....	59
1.5.1 Spannungen .....	59
1.5.2 Ströme .....	59
1.5.3 Energien .....	59
1.5.4 Regelungstechnische Größen .....	59
1.5.5 Sonstige Größen .....	60

<b>2</b>	<b>Elektronische Schalter</b> .....	<b>61</b>
2.1	Bauelemente und Baugruppen .....	61
2.1.1	Allgemeines .....	61
2.1.2	Leistungsdioden .....	61
2.1.2.1	Kennlinie und Durchlaßspannung .....	62
2.1.2.2	Beispiel .....	62
2.1.2.3	Formfaktor .....	63
2.1.2.4	Durchlaßverlustleistung .....	64
2.1.2.5	Beispiel .....	65
2.1.2.6	Schaltbedingungen und Sperrspannungsbeanspruchung .....	65
2.1.2.7	Arten von Leistungsdioden .....	66
2.1.3	Thyristoren (SCR) .....	67
2.1.4	Triac .....	70
2.1.5	Dynamisches Verhalten der Halbleiterventile .....	71
2.1.5.1	Einschaltvorgang .....	71
2.1.5.2	Einschaltverlustleistung .....	72
2.1.5.3	Ausschaltvorgang .....	73
2.1.5.4	Dynamische Kenngrößen (Stromsteilheit) .....	74
2.1.5.5	Dynamische Kenngrößen (Spannungssteilheit) .....	74
2.1.6	Reihen- und Parallelschaltung von Dioden und Thyristoren .....	75
2.1.6.1	Reihenschaltung .....	75
2.1.6.2	Beispiel einer Reihenschaltung .....	76
2.1.6.3	Parallelschaltung .....	76
2.1.6.4	Antiparallelschaltung .....	77
2.1.6.5	Beispiel Wechselstromsteller .....	77
2.1.7	Leistungshalbleiterbaugruppen .....	78
2.1.8	Selengleichrichter .....	78
2.1.9	Leistungstransistoren .....	79
2.1.9.1	Dreifachdiffundierte Transistoren .....	79
2.1.9.2	Leistungstransistoren in Darlingtonschaltung .....	80
2.1.9.3	Leistungstransistoren in Epitaxietechnik .....	81
2.1.9.4	Beispiel Schaltnetzteil .....	81
2.1.9.5	Beispiel eines 400 A Leistungsschalters mit Transistoren .....	82
2.2	Schutz der Siliziumventile .....	83
2.2.1	Überspannungsschutz .....	83
2.2.1.1	Schutz gegen Überspannungen durch den Trägerstauereffekt .....	83
2.2.1.2	Überspannungen durch Schaltheandlungen .....	84
2.2.1.3	Schutzelemente gegen Überspannung .....	85
2.2.2	Schutz gegen Überströme und Kurzschluß .....	88
2.2.2.1	Schutz durch Sicherungen .....	88
2.2.2.2	Überstromschutz-Kombinationen .....	88
2.2.3	Übertemperaturschutz .....	92
2.2.3.1	Allgemeines .....	92
2.2.3.2	Statisches thermisches Verhalten .....	93
2.2.3.3	Beispiel: Vier Dioden auf einem Kühlkörper .....	93
2.2.3.4	Dynamisches, thermisches Verhalten .....	94
2.2.3.5	Arten der Wärmeableitung .....	95

2.3	Wechsel- und Drehstromschalter .....	97
2.3.1	Allgemeines .....	97
2.3.2	Wechselstromschalter .....	98
2.3.2.1	Grundprinzip des Nullspannungsschalters .....	98
2.3.2.2	Elektronische Lastrelais .....	100
2.3.2.3	ELR in Selbsthalteschaltung .....	103
2.3.3	Drehstromschalter .....	104
2.3.3.1	Allgemeines .....	104
2.3.3.2	Dreieckschaltung .....	105
2.3.3.3	Sternschaltung mit Mittelleiter .....	106
2.3.3.4	Sternschaltung ohne Mittelleiter .....	106
2.3.3.5	Drehstromschalter mit reduziertem Schalteraufwand .....	107
2.3.4	Typische Anwendungsfälle .....	108
2.3.4.1	Drehstromschalter mit Wechselstromzündung .....	108
2.3.4.2	Drehstromschalter mit Gleichspannungzündung .....	109
2.3.4.3	Drehstromschalter mit ELR .....	110
2.3.4.4	Elektronische Wendeschüttschaltung .....	112
2.3.5	Projektierungshinweise .....	114
2.3.5.1	Erwärmung und Kühlung .....	114
2.3.5.2	Belastbarkeit .....	115
2.3.5.3	Überstrom- und Kurzschlußschutz .....	115
2.3.5.4	Sicherungsauswahl .....	116
2.3.5.5	Überspannungsschutz .....	117
2.4	Gleichstromschalter .....	117
2.4.1	Allgemeines .....	117
2.4.2	Elektronische Lastrelais für Gleichstrom .....	118
2.4.3	Gleichstromschalter mit Transistoren .....	118
2.4.3.1	Gleichstromschalter mit bipolaren Transistoren .....	118
2.4.3.2	Gleichstromschalter mit Feldeffekt-Transistoren .....	119
2.4.3.3	Beispiel VMOS-Leistungsschalter .....	120
2.4.4	Gleichstromschalter mit GTO-Thyristoren .....	121
2.4.5	Gleichstromschalter mit Thyristoren .....	121
2.4.5.1	Thyristor-Gleichstromschalter mit ohmscher Last .....	121
2.4.5.2	Thyristor-Gleichstromschalter mit ohmsch-induktiver Last .....	124
2.5	Formelzeichen .....	129
2.5.1	Spannungen .....	129
2.5.2	Ströme .....	129
2.5.3	Widerstände .....	130
2.5.4	Leistungen .....	130
2.5.5	Sonstige Größen .....	130
2.6	Kurzzeichen und Datenblätter .....	131
2.6.1	Datenblatt Diode DS 6 (BBC) .....	131
2.6.2	Datenblatt Diode D 250 (AEG) .....	134
2.6.3	Datenblatt Thyristor BSt DO 3 .....	137
2.6.4	Datenblatt Thyristor CS 300 .....	140
2.6.5	Datenblatt Triac TXD 98 .....	145

<b>3</b>	<b>Elektronische Steller</b> .....	<b>148</b>
3.1	Allgemeines .....	148
3.2	Schwingungspaketsteuerung .....	148
3.2.1	Grundprinzip .....	148
3.2.2	WS-Steller mit Schwingungspaketsteuerung für ohmsch-induktive Last und für Trafolast .....	150
3.2.2.1	Geräteaufbau .....	150
3.2.2.2	Schalten von ohmsch-induktiver Last .....	152
3.2.2.3	Schalten von Transformatoren .....	153
3.2.3	Drehstromsteller mit Vollwellensteuerung in Sparschaltung .....	154
3.2.4	Anschluß von Geräten mit Schwingungspaketsteuerung .....	155
3.3	Phasenanschnittsteuerung .....	156
3.3.1	Grundprinzip .....	156
3.3.2	Vergleich Stelltrafo – Wechselstromsteller .....	158
3.3.3	Wechselstromsteller mit Widerstandslast .....	160
3.3.3.1	Steuerkennlinie des Wechselstromstellers bei ohmscher Last .....	161
3.3.4	Wechselstromsteller mit induktiver Last .....	162
3.3.5	Wechselstromsteller mit ohmsch-induktiver Last .....	165
3.3.6	Steuerschaltung mit dem TCA 780 .....	167
3.3.6.1	Allgemeines .....	167
3.3.6.2	Funktionsbeschreibung und Impulsdiagramm .....	167
3.3.6.3	Technische Daten .....	169
3.3.6.4	Anwendungsbeispiel eines Wechselstromstellers .....	172
3.4	Steuerblindleistung .....	174
3.4.1	Allgemeines .....	174
3.4.2	Meßtechnische Blindleistungsermittlung an einer W 1-Schaltung mit Widerstandslast .....	174
3.4.3	Stromoberschwingungen .....	175
3.4.4	„Totaler Leistungsfaktor“ .....	176
3.5	Drehstromsteller .....	177
3.5.1	Allgemeines .....	177
3.5.2	Spannungsbetrachtung .....	179
3.5.3	Steuerkennlinien .....	182
3.6	Gleichstromsteller .....	183
3.6.1	Allgemeines .....	183
3.6.2	Gleichstromsteller mit Transistoren .....	183
3.6.2.1	„Analog“ arbeitender Gleichstromsteller .....	183
3.6.2.2	„Schaltender“ Gleichstromsteller .....	184
3.6.3	Gleichstromsteller mit Thyristoren .....	185
3.6.4	Steuerarten von Gleichstromstellern .....	189
3.6.4.1	Pulsbreitensteuerung .....	189
3.6.4.2	Frequenzsteuerung .....	190
3.6.4.3	Zweipunktregelung .....	191
3.6.5	Transistorsteller für 5,2 kW-Gleichstrommotor .....	191
3.7	Thyristor-Gleichstromsteller mit Umschwingkreis .....	194
3.7.1	Allgemeines .....	194

3.7.2	Versuchsschaltung eines Thyristor-Gleichstromstellers mit Umschwingkreis .....	194
3.7.2.1	Einschaltvorgang .....	194
3.7.2.2	Ausschaltvorgang .....	195
3.8	Abschlußbetrachtung .....	196
3.9	Formelzeichen .....	197
3.9.1	Spannungen .....	197
3.9.2	Ströme .....	197
3.9.3	Leistungen .....	198
3.9.4	Sonstige Größen .....	198
<b>4</b>	<b>Ungesteuerte Stromrichter (Gleichrichter) .....</b>	<b>199</b>
4.1	Grundbegriffe und Definitionen .....	199
4.1.1	Beispiel: Pulsierende Spannung, pulsierender Strom .....	199
4.1.2	Leistungsbetrachtungen .....	200
4.1.3	Beispiel: Ermittlung der Welligkeit .....	201
4.2	Einpuls-Mittelpunktschaltung (M 1) .....	202
4.2.1	Allgemeines .....	202
4.2.2	Spannungsbetrachtung .....	202
4.2.3	Pulszahl und Welligkeit .....	203
4.2.3.1	Ermittlung der Welligkeit .....	204
4.2.4	Strombetrachtung .....	204
4.2.5	Leistungsbetrachtung .....	206
4.3	Zweipuls-Stromrichter .....	208
4.3.1	Allgemeines .....	208
4.3.2	Zweipuls-Mittelpunktschaltung (M 2) .....	208
4.3.3	Zweipuls-Brückenschaltung (B 2) .....	209
4.3.3.1	Spannungsbetrachtung .....	209
4.3.3.2	Pulszahl und Welligkeit .....	211
4.3.3.3	Strombetrachtung .....	211
4.3.3.4	Leistungsbetrachtung .....	212
4.3.4	Zweipuls-Stromrichter mit induktiver Last .....	212
4.4	Dreipuls-Stromrichter .....	214
4.4.1	Allgemeines .....	214
4.4.2	Dreipuls-Mittelpunktschaltung (M 3) .....	214
4.4.2.1	Spannungsbetrachtung .....	214
4.4.2.2	Pulszahl und Welligkeit .....	216
4.4.2.3	Strombetrachtung .....	217
4.4.2.4	Leistungsbetrachtung .....	218
4.5	Sechspuls-Stromrichter .....	219
4.5.1	Allgemeines .....	219
4.5.2	Spannungsbetrachtung .....	219
4.5.3	Strombetrachtung .....	221
4.5.4	Leistungsbetrachtung .....	222
4.6	Zusammenfassung .....	223

4.6.1	Wichtige Gleichrichterdaten (Bild 4.21) .....	223
4.6.2	Auslegung eines Stromrichters .....	224
4.6.3	Schlußbetrachtung .....	225
4.7	Formelzeichen .....	225
4.7.1	Spannungen .....	225
4.7.2	Ströme .....	225
4.7.3	Leistungen .....	226
4.7.4	Sonstige Größen .....	226
<b>5</b>	<b>Gesteuerte Stromrichter .....</b>	<b>227</b>
5.1	Allgemeines .....	227
5.2	Einpuls-Stromrichter .....	227
5.2.1	Allgemeines .....	227
5.2.2	Einpuls-Stromrichter mit ohmscher Last .....	227
5.2.2.1	Spannungsbetrachtung .....	228
5.2.2.2	Strombetrachtung .....	228
5.2.2.3	Steuerkennlinie .....	229
5.2.2.4	Beispiel .....	230
5.2.3	Einpuls-Stromrichter mit induktiver Last .....	230
5.2.4	Einpuls-Stromrichter mit ohmsch-induktiver Last .....	231
5.3	Mehrpulsige vollgesteuerte Stromrichter .....	232
5.3.1	Allgemeines .....	232
5.3.2	Zweipuls-Brückenschaltung .....	232
5.3.2.1	Allgemeines .....	232
5.3.2.2	Spannungsbetrachtung .....	234
5.3.2.3	Steuerkennlinie .....	234
5.3.2.4	Lückbetrieb .....	235
5.3.2.5	Sperrspannungsbetrachtung .....	236
5.3.2.6	Wechselrichterbetrieb .....	237
5.3.3	Gesteuerte Dreipuls-Mittelpunktschaltung .....	237
5.3.3.1	Steuerbereich des Dreipuls-Stromrichters .....	238
5.3.3.2	Spannungsbetrachtung .....	239
5.3.3.3	Beispiel .....	240
5.3.3.4	Betrieb mit unterschiedlichen Lastarten .....	240
5.3.3.5	Der Kommutierungsvorgang am Beispiel der M3-Schaltung .....	242
5.3.3.6	Wechselrichterstabilität .....	244
5.3.4	Vollgesteuerte Drehstrom-Brückenschaltung .....	245
5.3.4.1	Allgemeines .....	245
5.3.4.2	Steuerbereich des B 6-Stromrichters .....	246
5.3.4.3	Zündimpulsfolge .....	247
5.3.4.4	B 6-Stromrichter mit unterschiedlicher Last .....	251
5.3.4.5	Betrieb mit Gegenspannung .....	253
5.3.5	Belastungskennlinien gesteuerter Stromrichter .....	254
5.4	Halbgesteuerte Stromrichter .....	255
5.4.1	Allgemeines .....	255
5.4.2	Zweipulsige halbgesteuerte Brückenschaltung .....	256

5.4.2.1	Symmetrische halbgesteuerte Zweipuls-Brückenschaltung	258
5.4.2.2	Unsymmetrische halbgesteuerte Zweipuls-Brückenschaltung	260
5.4.3	Sechspulsige halbgesteuerte Brückenschaltung	261
5.5	Leistungsbetrachtung	264
5.5.1	Allgemeines	264
5.5.2	Leistung in der Stromrichtertechnik	265
5.5.3	Blindleistungssparende Schaltungen	267
5.5.3.1	Kompensation der Blindleistung	267
5.5.3.2	Halbgesteuerte Stromrichter	268
5.5.3.3	Schaltungen mit Freilaufdiode	269
5.5.3.4	Folgesteuerung 2 B 2 HZ	269
5.5.3.5	Löschbare Stromrichter	270
5.5.4	Netzurückwirkungen	271
5.6	Formelzeichen	271
5.6.1	Spannungen	271
5.6.2	Ströme	272
5.6.3	Leistungen	272
5.6.4	Sonstige Größen	272
<b>6</b>	<b>Stromrichterantriebe mit Gleichstrommotor</b>	<b>274</b>
6.1	Gleichstrommotoren	274
6.1.1	Allgemeines	274
6.1.2	Wirkungsweise des Gleichstrommotors	274
6.1.3	Grundsaltungen	278
6.1.3.1	Nebenschlußmotor	278
6.1.3.2	Reihenschlußmotor	279
6.1.3.3	Doppelschlußmotor	280
6.1.4	Betriebsarten der Gleichstrommaschine	281
6.2	Gleichstrommotor und Arbeitsmaschine	283
6.2.1	Allgemeines	283
6.2.2	Mechanische Kenngrößen	284
6.2.2.1	Beispiel Hubantrieb	286
6.2.3	Antriebskenngrößen	287
6.2.3.1	Berechnung eines Antriebes	287
6.3	Stromrichtermerkmale	288
6.3.1	Allgemeines	288
6.3.2	Einquadrantenbetrieb	289
6.3.3	Zweiquadrantenbetrieb	289
6.3.4	Vierquadrantenbetrieb	291
6.4	Einquadranten-Stromrichter	294
6.4.1	Allgemeines	294
6.4.2	Prinzip des geregelten 1 Q-Antriebes	294
6.5	Aufbau von charakteristischen 1 Q-Stromrichtern	296
6.5.1	Allgemeines	296
6.5.2	Sollwertintegrator SWI	296
6.5.3	Drehzahlregler	299

6.5.4	Drehzahlwertgeber .....	301
6.5.5	Ankerspannungsregelung .....	303
6.5.6	Stromregler .....	304
6.5.7	Strom-Istwerterfassung .....	305
6.5.7.1	Allgemeines .....	305
6.5.7.2	Gleichstromwandler .....	306
6.5.7.3	Wechselstromwandler .....	306
6.5.7.4	Shuntwandler .....	308
6.5.8	Steuersatz .....	309
6.5.9	Leistungsteil .....	309
6.5.10	Synchronisation .....	311
6.6	Einquadranten-Stromrichter mit Stromaufschaltung .....	312
6.6.1	Allgemeines .....	312
6.6.2	Stromaufschaltung .....	314
6.7	Anwendungsbeispiele .....	315
6.7.1	Leitspannungsbetrieb .....	315
6.7.2	Reversierbetrieb .....	315
6.7.3	Elektrodynamisches Bremsen .....	317
6.7.4	Stromverhältnisregelung .....	317
6.8	Vierquadranten-Stromrichter .....	318
6.8.1	Allgemeines .....	318
6.8.2	Vierquadranten-Stromrichter mit elektromechanischer Ankerkreisumschaltung .....	320
6.8.3	Vierquadranten-Stromrichter mit elektronischer Umschaltung .....	320
6.8.3.1	Allgemeines .....	320
6.8.3.2	Sollwertintegrator .....	322
6.8.3.3	Besonderheiten der n- und I-Regler .....	323
6.8.3.4	Überwachungsschaltung mit Reglersperre .....	323
6.8.3.5	Umschaltlogik .....	324
6.8.4	Vierquadranten-Stromrichter mit direkter Umschaltmöglichkeit .....	325
6.9	Optimierung der Einstellung von Reglern .....	326
6.9.1	Allgemeines .....	326
6.9.2	Optimierungsrichtlinien .....	326
6.10	Ermittlung der Stromrichterbetriebsart .....	328
6.11	Formelzeichen .....	328
6.11.1	Spannungen .....	328
6.11.2	Ströme .....	328
6.11.3	Sonstige Größen .....	330
<b>7</b>	<b>Stromrichter mit Drehstrom-Asynchronmotor .....</b>	<b>332</b>
7.1	Drehstromnetz .....	332
7.1.1	Stern- und Dreieckschaltung .....	332
7.1.2	Leistungsumsatz bei symmetrischer Last .....	333
7.2	Drehstrom-Asynchronmotor .....	334
7.2.1	Allgemeines .....	334
7.2.2	Wirkungsweise .....	334



7.2.2.1	Drehmomenterzeugung	334
7.2.2.2	Drehfeldumkehr	335
7.2.2.3	Polpaarzahl	336
7.2.3	Ausführungsarten	336
7.2.3.1	Käfigläufer	336
7.2.3.2	Stromverdrängungsläufer	338
7.2.3.3	Schleifringläufer	339
7.3	Motor und Arbeitsmaschine	340
7.3.1	Allgemeines	340
7.3.2	Motor Kenngrößen	341
7.3.2.1	Ermittlung der Leistungsdaten	342
7.3.3	Kenngrößen von Arbeitsmaschinen	344
7.3.3.1	Projektierung eines Lüfterantriebes	345
7.4	Drehzahlverstellung bei konstanter Betriebsfrequenz	348
7.4.1	Allgemeines	348
7.4.2	Steller im Ständerkreis	348
7.4.3	Steller im Läuferkreis	348
7.4.4	Gegenspannung im Läuferkreis	350
7.5	Drehzahlverstellung mit Direkt-Umrichter	352
7.5.1	Allgemeines	352
7.5.2	Trapezumrichter	352
7.5.3	Steuerumrichter	354
7.6	Drehzahlverstellung mit Zwischenkreis-Umrichter	355
7.6.1	Allgemeines	355
7.6.2	Dreiphasiger Wechselrichter	355
7.6.3	Umrichter mit Gleichstromzwischenkreis	358
7.6.4	Umrichter mit Gleichspannungszwischenkreis	361
7.6.4.1	Variable Zwischenkreisspannung	361
7.6.4.2	Konstante Zwischenkreisspannung	363
7.7	Frequenzumrichter kleiner Leistung	364
7.7.1	Allgemeines	364
7.7.2	Anwendungsbeispiel	367
7.7.3	Entwicklungstendenzen der Leistungselektronik	371
7.8	Formelzeichen	372
7.8.1	Spannungen	372
7.8.2	Ströme	372
7.8.3	Leistungen	372
7.8.4	Antriebs- und Motorkenngrößen	373
7.8.5	Sonstige Größen	373
<b>Sachwortverzeichnis</b>		<b>375</b>
<b>Informationen</b>		<b>390</b>