

Inhaltsverzeichnis

Teil I: Grundlagen

1. Einführung und Übersicht	17
1.1. Die volkswirtschaftliche Bedeutung der Leistungselektronik	17
1.2. Prinzipieller Aufbau von Stromrichtern	20
1.3. Leistungselektronik und Mikroelektronik	24
2. Halbleiterventile	28
2.1. Übersicht	28
2.2. Physikalische Grundlagen und Aufbau von Dioden, Thyristoren und Triacs ..	28
2.3. Elektrische Eigenschaften der Dioden, Thyristoren und Triacs	35
2.3.1. Sperr- und Blockierzustand	35
2.3.2. Durchlaßzustand (Kennlinien DK in den Bildern 2.2.3, 2.2.7 und 2.2.9)	36
2.3.3. Zündung	39
2.3.4. Schaltverhalten	39
2.4. Schalttransistoren	41
2.4.1. Bipolare Schalttransistoren	41
2.4.1.1. Wirkungsweise	41
2.4.1.2. Elektrische Eigenschaften	42
2.4.2. Unipolare Schalt- oder Feldeffekttransistoren (MOSFETs)	45
2.5. Thermische Eigenschaften der Halbleiterventile	47
2.5.1. Temperaturen	47
2.5.2. Stationäre Wärmewiderstände	47
2.5.3. Nichtstationäre Wärmewiderstände	49
2.6. Reihen- und Parallelschaltung	51
2.7. Qualitätskontrolle und Zuverlässigkeit	53
3. Schaltungen der Stromrichter	54
3.1. Gleichrichter	55
3.1.1. Einpulsleichrichter	55
3.1.1.1. Widerstandslast	55
3.1.1.2. Glättung mit einer Drossel	58

3.1.1.3. Glättung mit einem Kondensator	59
3.1.1.4. Arbeit auf Gegenspannung	59
3.1.1.5. Schaltung mit Freilaufzweig	59
3.1.1.6. Spannungsverdoppler- und -vervielfacherschaltungen	60
3.1.2. Zweipulsgleichrichter	61
3.1.2.1. Mittelpunkt- und Brückenschaltung	61
3.1.2.2. Widerstandslast	61
3.1.2.3. Belastung mit Widerstand, Glättung mit Drossel oder Kondensator	63
3.1.2.4. Betrieb mit Freilaufzweig, halbgesteuerte Schaltung	63
3.1.2.5. Verdopplerschaltung	67
3.1.3. Dreipulsgleichrichter	67
3.1.4. Sechspulsgleichrichter	69
3.1.4.1. Brückenschaltung	69
3.1.4.2. Saugdrosselschaltung	72
3.1.5. Gleichrichter mit $p = 12, 24$ usw.	73
3.1.6. Lückender Gleichstrom	75
3.2. Stromrichtertransformator, Oberschwingungen, Steuerung	76
3.2.1. Stromrichtertransformator	76
3.2.1.1. Auslegung	76
3.2.1.2. Streureaktanz des Transformators und Netzreaktanz	76
3.2.2. Oberschwingungen der Gleichspannung und der Netzströme	80
3.2.2.1. Oberschwingungen der Gleichspannung	81
3.2.2.2. Oberschwingungen der Netzströme	82
3.2.3. Steuerung der Gleichspannung	84
3.2.3.1. Phasenanschnittsteuerung	85
3.2.3.2. Transformator mit Anzapfungen oder Stelltransformator	87
3.3. Netzgelöschter Wechselrichter, Umkehrstromrichter	88
3.3.1. Netzgelöschter Wechselrichter	88
3.3.2. Umkehrstromrichter	90
3.3.2.1. Wirkungsweise der Gegenparallelschaltung (kreisstromfreier Betrieb)	91
3.3.2.2. Schaltungen	92
3.3.2.3. Betrieb ohne und mit Kreisstrom	93
3.4. Kurzschlußströme	95
3.4.1. Grundlagen	96
3.4.2. Berechnungsverfahren	98
3.4.2.1. Übersicht	98
3.4.2.2. Berechnungsgleichungen	99
3.4.3. Berechnungsbeispiel	100
3.5. Selbst- und lastgelöschte Wechselrichter, Umrichter	103
3.5.1. Selbstgelöschte Wechselrichter	103
3.5.1.1. Einführung	103
3.5.1.2. Einphasige selbstgelöschte Spannungswechselrichter	105
3.5.1.3. Wechselrichter mit Drehstromausgang	108
3.5.1.4. Spannungsstellung	111

3.5.1.5. Stromwechselrichter	112
3.5.1.6. Auslegung von Wechselrichtern	113
3.5.2. Lastgelöschte Wechselrichter	115
3.5.2.1. Wechselrichter mit parallelkompensierter Last	115
3.5.2.2. Dimensionierungsbeispiel	118
3.5.2.3. Schaltungsvarianten	119
3.5.3. Umrichter mit Gleichstromzwischenkreis	121
3.5.4. Direkte Umrichter	122
3.6. Wechsel- und Drehstromsteller	125
3.6.1. Wirkungsweise	126
3.6.1.1. Wechselstromsteller	126
3.6.1.2. Vollgesteuerter Drehstromsteller	128
3.6.1.3. Halbgesteuerter Drehstromsteller	130
3.6.2. Kennlinien und Kenngrößen	131
3.6.2.1. Wechselstromsteller	131
3.6.2.2. Drehstromsteller	133
3.6.3. Wechsel- und Drehstromsteller mit nachgeschaltetem Gleichrichter	134
3.6.4. Schaltungswahl	135
3.7. Gleichstromsteller	136
3.7.1. Wirkungsweise der Grundsaltungen, Steuerungsverfahren	136
3.7.2. Stellerschaltungen	139
3.7.3. Betriebseigenschaften und -kenngrößen, Steuerkennlinie, Berechnungsbeispiel	140
3.8. Ansteuergeräte	142
3.8.1. Aufgaben	142
3.8.2. Ansteuergeräte für die Zündwinkelsteuerung bei netzgelöschten Stromrichtern	142
3.8.2.1. Ansteuergeräte für einphasige, zweipulsige Stromrichter	142
3.8.2.2. Ansteuergeräte für die gebräuchlichen netzgelöschten Stromrichter	145
3.8.2.3. Gebräuchliche Ausführungsformen der Funktionseinheiten	148
3.8.3. Ansteuergeräte für selbst- und lastgelöschte Wechselrichter	159
3.8.4. Ansteuergeräte für Gleichstromsteller	161
3.8.5. Treiberschaltungen	162
4. Grundsätzliches über Geräte und Anlagen der Leistungselektronik	164
4.1. Betriebsbedingungen, Betriebsarten, Betriebsverhalten, Netzzrückwirkungen	164
4.1.1. Betriebsbedingungen und Betriebsarten	164
4.1.1.1. Speisung des Leistungsteils aus einem Wechselstromnetz	164
4.1.1.2. Speisung des Leistungsteils aus einem Gleichspannungsnetz	166
4.1.1.3. Speisung der Informationselektronik	167
4.1.1.4. Umgebungsbedingungen	168
4.1.1.5. Betriebsarten und Belastungsklassen	168
4.1.2. Belastungskennlinien	168
4.1.2.1. Gleichrichter kleiner Leistung	170
4.1.2.2. Gleichrichter mittlerer und großer Leistung	171

4.1.3.	Welligkeit der Gleichspannung und des Gleichstroms	173
4.1.4.	Wirkungsgrad	174
4.1.5.	Blindleistung, Verschiebungsfaktor	174
4.1.6.	Netzurückwirkungen und ihre Verringerung	176
4.1.6.1.	Kriterien für die Qualität der Netzspannung	177
4.1.6.2.	Verzerrung der Netzspannung im Speisepunkt	179
4.1.6.3.	Netzurückwirkungen ohne Leistungskondensatoren	180
4.1.6.4.	Kompensation mit einem Leistungskondensator	183
4.1.6.5.	Kompensation mit Saugkreisen	185
4.1.6.6.	Netzurückwirkungen bei Niederspannungsnetzen zur Versorgung von Hausanschlüssen	186
4.1.7.	Auslegung typischer Bauteile	188
4.1.7.1.	Stromrichtertransformator	188
4.1.7.2.	Ventile	188
4.1.8.	Zuverlässigkeit und Störverhalten	189
4.1.8.1.	Ausfallrate von Halbleiter-Leistungsbau-elementen	189
4.1.8.2.	Zuverlässigkeit der Funktion des Leistungsteils	190
4.1.8.3.	Kurzschlußstromtragfähigkeit	191
4.1.8.4.	Ausblick	191
4.2.	Schalt-, Schutz-, Zusatz- und Hilfseinrichtungen	192
4.2.1.	Schutz gegen Überspannungen und Überstrom	192
4.2.1.1.	Schutz gegen Überspannungen	192
4.2.1.2.	Schutz gegen strommäßige Überlastungen	195
4.2.2.	Kondensatorbatterien und Blindleistungsstromrichter zur Kompensation der Blindleistung	200
4.2.3.	Funkentstörung	205
4.2.4.	Kühlverfahren und -einrichtungen	206
4.2.4.1.	Luftkühlung	206
4.2.4.2.	Flüssigkeitskühlung	208
4.2.4.3.	Verdampfungskühlung	208
4.3.	Informationseinrichtungen	209
4.3.1.	Grundsätzliche Betrachtungen	209
4.3.1.1.	Baugruppensysteme	209
4.3.1.2.	Elemente des Regelkreises	211
4.3.1.3.	Grundsätzliche Forderungen an die Funktionseinheiten	213
4.3.1.4.	Einsatzbedingungen	213
4.3.1.5.	Störbeeinflussung	215
4.3.1.6.	Prüfung und Service	217
4.3.2.	Analoge und digitale Informationsverarbeitung	217
4.3.2.1.	Einsatzgebiete	217
4.3.2.2.	Signale	219
4.3.3.	Häufig verwendete Funktionseinheiten	219
4.3.3.1.	Analoge Sollwertvorgabe	219
4.3.3.2.	Istwertgeber für den Strom	221
4.3.3.3.	Istwertgeber für die Drehzahl	221
4.3.3.4.	Sollwert-Istwert-Vergleich	222

4.3.3.5. Regelverstärker	223
4.3.3.6. Rechenfunktionseinheiten	224
4.3.3.7. Potentialtrenner	225
4.3.3.8. Stromversorgung	226
4.4. Baureihen von Geräten und Anlagen	227
4.4.1. Baugruppenbildung	227
4.4.2. Spezielle Anforderungen	229
4.4.3. Ausführung von Stromrichtergeräten und Anlagen	235
 Teil II: Anwendungen	
5. Geräte und Anlagen zur Stromversorgung	253
5.1. Speisung von Gleichstromnetzen	253
5.1.1. Industrienetze	253
5.1.2. Bahnstromversorgung	256
5.1.2.1. Gestaltung von Unterwerken	256
5.1.2.2. Bahnstromrichter	258
5.2. Ladegeräte und Geräte zur Speisung von Fernmeldeanlagen	269
5.2.1. Ladegeräte	269
5.2.1.1. Ladegeräte mit W-Kennlinie	269
5.2.1.2. Ladegeräte mit Wa- und IU-Kennlinie	271
5.2.1.3. Pufferladegeräte	273
5.2.2. Geräte zur Speisung von Fernmeldeanlagen	273
5.2.2.1. Stromversorgungsgerät für mittlere Nebenstellenanlagen und kleine Wahlvermittlungsstellen	274
5.2.2.2. Stromversorgungsgerät für größere Wahlvermittlungsstellen	277
5.2.2.3. Netzgeräte	280
5.3. Notstromversorgung, Stromversorgung für Schienenfahrzeuge und Hoch- spannungsanlagen	285
5.3.1. Notstromversorgung für Wechselstromverbraucher	285
5.3.2. Elektroenergieversorgung für Schienenfahrzeuge	288
5.3.2.1. Energieverbraucher in Reisezugwagen	288
5.3.2.2. Autonome Energieversorgung (AEV) von Reisezugwagen	289
5.3.2.3. Zentrale Energieversorgung (ZEV) von Reisezugwagen	291
5.3.2.4. Einrichtungen auf Triebfahrzeugen zur Energieversorgung aus der Zugsammelschiene	296
5.3.2.5. Elektrische Triebwagenzüge	296
5.3.3. Stromversorgung für Hochspannungsanlagen	298
5.3.3.1. Elektrofilter	298
5.3.3.2. Gleichspannungsprüfanlagen	301
5.4. Elektronische Erregung von Synchronmaschinen	303
5.4.1. Allgemeine Gesichtspunkte	303
5.4.2. Ruhende Gleichrichter	303

5.4.2.1. Ruhende, ungesteuerte Gleichrichter	303
5.4.2.2. Ruhende, gesteuerte Gleichrichter	304
5.4.3. Bürstenlose Erregung	308
5.5. Thyristorschalter	311
5.5.1. Aufgaben und Entwicklungstendenzen für Schalter	311
5.5.2. Wechselstromschalter	313
5.5.3. Drehstromschalter	314
5.5.4. Stufenschalter mit Thyristor-Lastumschalter	316
5.5.5. Gleichstromschalter	317
5.5.6. Ansteuern von Thyristoren in Schaltern	319
5.5.7. Einsatz in Automatisierungsanlagen	321
6. Stromrichter für Antriebsregelungen	324
6.1. Übersicht	324
6.2. Einrichtungsantriebe mit Gleichstrommotoren	328
6.2.1. Stellglieder mit Netzlöschung	329
6.2.1.1. Stellglieder kleiner Leistung bis etwa 30 kW	329
6.2.1.2. Stellglieder mittlerer Leistung bis etwa 250 kW	333
6.2.1.3. Stellglieder großer Leistung von 250 kW bis zu einigen Megawatt ...	334
6.2.1.4. Übertragungsverhalten	338
6.2.1.5. Zuverlässigkeit	343
6.2.1.6. Anpassungsprobleme Stellglied – Gleichstrommaschine	344
6.2.2. Gleichstromsteller als Stellglieder	345
6.2.3. Mikrorechnereinsatz	349
6.2.4. Netzurückwirkungen netzgelöschter Stromrichter	350
6.2.5. Stromrichterauswahl mit Berechnungsbeispielen	352
6.3. Umkehr des Drehmoments	353
6.3.1. Schaltungen ohne und mit Kreisstrom	354
6.3.1.1. Übersicht	354
6.3.1.2. Umschaltungen im Ankerkreis	356
6.3.1.3. Umschaltung im Feldkreis	360
6.3.1.4. Umkehrschaltungen mit Selbstlöschungen	361
6.3.2. Betriebsverhalten	361
6.4. Stromrichter zur Speisung von Drehfeldmotoren	362
6.4.1. Übersicht	362
6.4.2. Untersynchrone Stromrichtererkaskade	363
6.4.3. Spannungssteuerung von Asynchronmotoren	366
6.4.3.1. Wirkungsweise	366
6.4.3.2. Der Drehstromsteller	367
6.4.4. Frequenzstellung von Asynchronmotoren	369
6.4.4.1. Stationäres und dynamisches Verhalten	369
6.4.4.2. Regelkreisstrukturen	371
6.4.4.3. Anwendung von Antrieben mit frequenzgestellten Asynchronmotoren	373

6.4.5.	Frequenzstellung von Synchronmotoren.....	375
6.4.5.1.	Fremdgetakteter Synchronmotor	375
6.4.5.2.	Eigengetakteter Synchronmotor (Stromrichter-motor)	377
6.4.5.3.	Anwendung von Antrieben mit frequenzgestellten Synchronmotoren	380
6.4.6.	Frequenzstellung von Linearmotoren.....	384
6.4.7.	Entwicklungs- und Anwendungsperspektiven von Antrieben mit frequenzgestellten Drehstrommotoren	384
6.5.	Antriebe für Traktionszwecke	385
6.5.1.	Allgemeine Darlegungen	385
6.5.2.	Wechselstromtriebfahrzeuge mit Kommutatorfahrmotoren	385
6.5.2.1.	Wechselstromsteller	385
6.5.2.2.	Steuerbare Gleichrichter	388
6.5.3.	Triebfahrzeuge mit Gleichstromstellern	391
6.5.4.	Triebfahrzeuge mit kommutatorlosen Fahrmotoren	394
6.5.5.	Vergleiche zwischen verschiedenen Stromrichter-Traktionsantrieben	397
7.	Stromversorgung für technologische Prozesse	399
7.1.	Gleichrichteranlagen für Elektrolysen	399
7.1.1.	Allgemeines	399
7.1.2.	Forderungen an die Gleichrichteranlage	400
7.1.3.	Anlagengestaltung	400
7.1.3.1.	Gleichrichtergruppen	400
7.1.3.2.	Wahl der Schaltung der Gleichrichtergruppen	402
7.1.3.3.	Anzahl der Gleichrichtergruppen	402
7.1.3.4.	Konstanthaltung des Stroms	402
7.1.4.	Gleichrichter.....	403
7.1.4.1.	Transformator-teil	403
7.1.4.2.	Gleichrichtereinheit	405
7.1.5.	Aufstellung	406
7.2.	Gleichrichter zur Speisung von Geräten zur Lichtbogenschweißung und von Lichtbogenöfen (Vakuum-Lichtbogenöfen und Plasmaschmelzöfen).....	407
7.2.1.	Anwendungsgebiet und Forderungen an die Stromversorgungseinrichtung	407
7.2.1.1.	Anwendungsgebiet.....	407
7.2.1.2.	Forderungen an die Stromversorgungseinrichtung und Besonderheiten der Lichtbogenspeisung	407
7.2.2.	Grundschaltungen der Stromversorgungseinrichtung	410
7.2.2.1.	Lichtbogen- und Plasmaschweißgeräte.....	410
7.2.2.2.	Vakuum-Lichtbogen- und Plasmaschmelzöfen	412
7.2.3.	Gleichstromspeisung für einen Plasmaschmelzofen großer Leistung ..	413
7.3.	Wechselstromsteller für Beleuchtungsanlagen, Widerstandsöfen und Schweißgeräte	418
7.3.1.	Beleuchtungsanlagen	418
7.3.2.	Steller für Widerstandsöfen	422
7.3.3.	Steller für Widerstandsschweißgeräte	423

7.4. Umrichter für Elektrowärmeanlagen	424
7.4.1. Umrichter mit sehr niedrigen Frequenzen	424
7.4.1.1. Umrichter für die elektromagnetische Durchmischung	424
7.4.1.2. Umrichter für das Elektro-Schlacke-Umschmelzverfahren	426
7.4.2. Umrichter mit Mittelfrequenz für die Induktionserwärmung	428
8. Konsumgüter	435
8.1. Schaltungen des Leistungs- und Steuerkreises	437
8.1.1. Leistungskreis	437
8.1.2. Steuerkreis	442
8.1.2.1. Phasenanschnittsteuerung	442
8.1.2.2. Schwingungspaketsteuerung	445
8.1.2.3. Spezielle Bauelemente (Triggerelemente)	446
8.1.2.4. Integrierte Schaltkreise (IC)	447
8.2. Anwendungen	452
8.2.1. Drehzahlsteuerung und -regelung	452
8.2.2. Begrenzung der Anschlußleistung thermischer Geräte	458
8.2.3. Kraftfahrzeugtechnik	460
9. Formelzeichen und Schaltzeichen	464
10. Literaturverzeichnis	468
11. Sachwörterverzeichnis	482