

# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einführung</b> .....	13
1.1. Einsatzgebiete der Leistungselektronik .....	13
1.2. Grundprinzip der Leistungselektronik .....	13
1.3. Stromrichteranlagen .....	16
1.4. Entwicklung der Leistungselektronik .....	18
<b>2. Halbleiterventile</b> .....	23
2.1. Physikalische Grundlagen .....	23
2.1.1. Übersicht über Halbleiter-Leistungsbaulemente .....	23
2.1.2. Dichte freier Ladungsträger im thermischen Gleichgewicht .....	25
2.1.2.1. Generation und Rekombination .....	25
2.1.2.2. Eigenhalbleiter .....	27
2.1.2.3. Störstellenleiter .....	27
2.1.3. Elektrischer Strom im Halbleiter .....	28
2.1.3.1. Feldstrom .....	28
2.1.3.2. Diffusionsstrom .....	28
2.1.4. Grundgesetze .....	29
2.1.5. Rückkehr zum thermischen Gleichgewicht nach Störungen .....	31
2.1.5.1. Injektion von Majoritätsträgern .....	31
2.1.5.2. Injektion von Minoritätsträgern .....	31
2.2. Dioden .....	33
2.2.1. pn-Dioden .....	33
2.2.1.1. Stromloser Zustand, Diffusionsspannung .....	33
2.2.1.2. Durchlaßzustand .....	36
2.2.1.3. Sperrzustand .....	40
2.2.1.4. Lawinendurchbruch .....	41
2.2.1.5. Punch-Through, Zenerdurchbruch, Wärme- oder zweiter Durchbruch .....	42
2.2.1.6. Lawinendioden .....	43
2.2.2. pin-Dioden .....	43
2.2.2.1. Stromloser Zustand .....	43
2.2.2.2. Sperrzustand .....	44
2.2.2.3. Durchlaßzustand .....	45
2.2.3. Schaltverhalten .....	46
2.2.3.1. Einschaltverhalten .....	46
2.2.3.2. Ausschaltverhalten ohne Sperrspannung .....	47
2.2.3.3. Ausschaltverhalten mit Sperrspannung, Trägerstauereffekt .....	47
2.2.3.4. Schnelle Leistungsdioden .....	48
2.2.4. Thermisches Verhalten .....	49
2.2.4.1. Grundlagen .....	49
2.2.4.2. Verlustleistung .....	51
2.2.4.3. Ableitung der Verlustwärme .....	54
2.2.4.4. Temperatur des Kristalls bei konstanter Verlustleistung .....	57
2.2.4.5. Temperatur des Kristalls bei zeitlich veränderlicher Verlustleistung .....	57
2.2.5. Grenzwerte und Kenngrößen .....	62

2.2.5.1. Definitionen	62
2.2.5.2. Beispiele für Grenzwerte	62
2.2.5.3. Beispiele für Kenngrößen	63
2.3. Thyristoren, Triacs	63
2.3.1. Einführung	63
2.3.2. Stationäre Betriebszustände, Zündung	66
2.3.2.1. Stromloser Zustand	66
2.3.2.2. Blockier- oder Vorwärtssperrzustand	66
2.3.2.3. Zündung	66
2.3.2.4. Emitterkurzschlüsse	69
2.3.2.5. Durchlaßzustand	70
2.3.2.6. Rückwärtssperrzustand	70
2.3.3. Schaltverhalten	71
2.3.3.1. Einschaltverhalten, kritische Stromsteilheit	71
2.3.3.2. Ausschaltverhalten, Freiwerdezeit	73
2.3.4. Frequenzthyristoren	74
2.3.5. Abschaltunterstützte und abschaltbare Thyristoren	75
2.3.6. Rückwärtsleitende Thyristoren	77
2.3.7. Fotothyristoren	77
2.3.8. Triacs	78
2.3.9. Thermisches Verhalten	81
2.3.10. Grenzwerte und Kenngrößen	81
2.3.11. Digitale Modelle für Thyristoren	82
2.4. Leistungs-Schalttransistoren	83
2.4.1. Schaltbetrieb und Linearbetrieb	83
2.4.2. Bipolare Leistungs-Schalttransistoren	84
2.4.2.1. Sperr- oder AUS-Zustand	85
2.4.2.2. Durchlaß- oder EIN-Zustand	86
2.4.2.3. Schaltverhalten	88
2.4.2.4. Thermisches Verhalten	90
2.4.2.5. Sicherer Arbeitsbereich	91
2.4.2.6. Darlington-Leistungstransistoren im Schaltbetrieb	92
2.4.3. Leistungs-MOSFETs für Schaltbetrieb	93
2.4.3.1. Funktionsprinzip und Aufbau	93
2.4.3.2. Statisches Verhalten	94
2.4.3.3. Schaltverhalten	97
2.4.3.4. Parallel- und Reihenschaltung	99
2.4.3.5. Thermisches Verhalten, SOAR-Bereich	100
2.5. Technologie der Halbleiterbauelemente	100
2.5.1. Anforderungen an die Technologie	100
2.5.2. Herstellung von Si-Einkristallen	101
2.5.3. Herstellung von Halbleiterbauelementen	105
2.6. Meßverfahren	109
2.6.1. Zur Einführung	109
2.6.2. Dioden und Thyristoren	110
2.6.2.1. Sperrichtung	110
2.6.2.2. Blockierrichtung beim Thyristor	110
2.6.2.3. Durchlaßrichtung	110
2.6.2.4. Schaltverhalten	112
2.6.2.5. Wärmewiderstand	113
2.7. Übungsaufgaben	115

<b>3. Netzgelöschte Stromrichter und Wechselstromsteller</b> .....	118
3.1. Einführung .....	118
3.2. Einpulsleichrichter, Gleichrichtertransformator, Verschiebungsfaktor .....	119
3.2.1. Einpulsleichrichter .....	119
3.2.1.1. Belastung mit Widerstand ohne Glättung .....	119
3.2.1.2. Glätten mit einer Drossel .....	125
3.2.1.3. Glätten mit einem Kondensator .....	128
3.2.1.4. Belastung mit Gegenspannung .....	132
3.2.1.5. Phasenanschnittsteuerung .....	133
3.2.1.6. Belastung mit Gegenspannung, Glätten mit einer Drossel .....	135
3.2.1.7. Einpulsleichrichter mit Freilaufzweig .....	137
3.2.1.8. Kaskadenschaltung .....	143
3.2.2. Gleichspannung und Gleichstrom mit überlagerten Wechselkomponenten .....	143
3.2.3. Gleichrichtertransformator, ventil- und netzseitige Ströme .....	146
3.2.4. Leistung bei verzerrten Strömen, Verschiebungsfaktor, Leistungsfaktor .....	148
3.3. Zweipulsleichrichter .....	150
3.3.1. Brücken- oder Graetzschaltung .....	150
3.3.2. Mittelpunktschaltung .....	154
3.3.3. Phasenanschnittsteuerung .....	155
3.3.3.1. Vollgesteuerte Brückenschaltung, Mittelpunktschaltung .....	155
3.3.3.2. Halbgesteuerte Brückenschaltung, Mittelpunktschaltung mit Freilaufzweig .....	158
3.3.3.3. Steuerblindleistung, Verschiebungsfaktor .....	159
3.3.4. Gesteuerter Gleichrichter als Verstärker .....	160
3.3.5. Kaskadenschaltung .....	162
3.4. Dreipulsleichrichter, induktiver Spannungsabfall .....	163
3.4.1. Stern-Stern-Mittelpunktschaltung .....	163
3.4.1.1. Vollständig geglätteter Gleichstrom .....	163
3.4.1.2. Beliebig geglätteter Gleichstrom .....	166
3.4.2. Stern-Zickzack-Mittelpunktschaltung .....	167
3.4.3. Phasenanschnittsteuerung .....	167
3.4.4. Induktiver Spannungsabfall .....	168
3.4.4.1. Kommutierung .....	169
3.4.4.2. Verlauf der ventilseitigen Ströme und der Gleichspannung während der Kommutierung .....	170
3.5. Sechspulsleichrichter und Gleichrichter höherer Pulszahl .....	172
3.5.1. Sechspuls-Brückenschaltung .....	172
3.5.1.1. Spannungen und Ströme .....	172
3.5.1.2. Phasenanschnittsteuerung .....	176
3.5.1.3. Induktiver Spannungsabfall .....	181
3.5.2. Sechspuls-Mittelpunktschaltungen .....	184
3.5.2.1. Dreieck-Doppelstern-Mittelpunktschaltung .....	184
3.5.2.2. Saugdrosselschaltung .....	184
3.5.3. Zwölfpulschaltungen .....	186
3.5.3.1. Parallelschaltung mit Saugdrossel .....	186
3.5.3.2. Reihenschaltung .....	187
3.5.4. Schaltungen mit $p > 12$ .....	187
3.5.5. Anwendungsgebiete für Gleichrichter .....	188
3.5.5.1. Netzgeräte .....	188
3.5.5.2. Ladegeräte .....	189
3.5.5.3. Gleichrichter zum Lichtbogenschweißen .....	189
3.5.5.4. Erregung von Synchronmaschinen .....	190

3.5.5.5. Gleichstrom-Bahnunterwerke . . . . .	191
3.5.5.6. Elektrolysen, galvanische Bäder . . . . .	192
3.5.5.7. Gleichrichter für Einquadrantenbetrieb von Gleichstrommotoren . . . . .	193
3.6. Netzgelöschte Wechselrichter, Umkehrstromrichter, netzgelöschte Wechselstromumrichter	197
3.6.1. Netzgelöschte Wechselrichter . . . . .	197
3.6.1.1. Wirkungsweise . . . . .	197
3.6.1.2. Spannungen, Ströme, Leistung . . . . .	198
3.6.1.3. Zündverfrühungswinkel . . . . .	200
3.6.2. Umkehrstromrichter, Umkehrantriebe . . . . .	201
3.6.3. Netzgelöschte Wechselstromumrichter . . . . .	203
3.6.3.1. Zwischenkreisumrichter . . . . .	204
3.6.3.2. Direktumrichter . . . . .	204
3.6.4. Anwendungsgebiete . . . . .	206
3.6.4.1. Stromversorgungsanlage für einen Sender . . . . .	206
3.6.4.2. Wechselrichter für magneto-hydrodynamische Generatoren . . . . .	207
3.6.4.3. Untersynchrone Stromrichter-kaskade . . . . .	208
3.6.4.4. Asynchrone Netzkupplungen und Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragungen . . . . .	210
3.6.4.5. Über Zwischenkreisumrichter gespeiste Synchronmotoren . . . . .	211
3.6.4.6. Einsatz von Direktumrichtern . . . . .	211
3.7. Wechsel- und Drehstromschalter und -steller . . . . .	212
3.7.1. Wechselstromschalter und -steller . . . . .	213
3.7.1.1. Wechselstromschalter . . . . .	213
3.7.1.2. Wechselstromsteller . . . . .	214
3.7.2. Drehstromschalter und -steller . . . . .	216
3.7.3. Anwendungsgebiete . . . . .	221
3.7.3.1. Hochspannungssteuerung mit Thyristorschaltwerk . . . . .	221
3.7.3.2. Beleuchtungseinrichtungen . . . . .	222
3.7.3.3. Steller für Widerstandsschweißgeräte . . . . .	223
3.7.3.4. Hochspannungsgleichrichter für Elektrofilter . . . . .	223
3.7.3.5. Temperaturregelung . . . . .	224
3.7.3.6. Spannungssteuerung von Asynchronmotoren . . . . .	225
3.8. Meßverfahren für netzgelöschte Stromrichter . . . . .	226
3.8.1. Prüfen von Gleichrichtern . . . . .	227
3.8.2. Wahl des Meßgerätetyps . . . . .	229
3.8.2.1. Spannungen und Ströme . . . . .	229
3.8.2.2. Leistung . . . . .	231
3.9. Übungsaufgaben . . . . .	232
<b>4. Selbst- und lastgelöschte Stromrichter . . . . .</b>	<b>238</b>
4.1. Gleichstromsteller . . . . .	238
4.1.1. Wirkungsweise des idealen Gleichstromstellers . . . . .	239
4.1.2. Berechnung des Gleichstromstellers mit abschaltbaren Halbleiterbauelementen . . . . .	240
4.1.3. Umkehr der Energierichtung und Mehrquadrantenbetrieb . . . . .	244
4.1.4. Gleichstromsteller mit Thyristoren . . . . .	245
4.1.4.1. Wirkungsweise der Kondensatorlöschung . . . . .	245
4.1.4.2. Berechnung des Löschvorgangs . . . . .	248
4.1.4.3. Löschsaltungen . . . . .	252
4.1.4.4. Gleichstromsteller-Saltungen mit Thyristoren . . . . .	254
4.1.5. Anwendungsbeispiele . . . . .	263
4.2. Selbstgelöschte Wechselrichter . . . . .	266
4.2.1. Einteilung und Wirkungsweise . . . . .	266
4.2.2. Stromgespeiste Wechselrichter . . . . .	269

4.2.2.1.	Einphasige Stromwechselrichter	269
4.2.2.2.	Dreiphasige Stromwechselrichter	276
4.2.3.	Spannungsgespeiste Wechselrichter	280
4.2.3.1.	Spannungswechselrichter mit abschaltbaren Halbleiterbauelementen	280
4.2.3.2.	Spannungswechselrichter mit Thyristoren	284
4.2.4.	Anwendungsbeispiele	297
4.3.	Lastgelöschte Wechselrichter	305
4.3.1.	Schwingkreis-Wechselrichter	305
4.3.1.1.	Grundsaltungen und Wirkungsweise	305
4.3.1.2.	Berechnung des Schwingkreis-Wechselrichters	307
4.3.2.	Maschinengelöschte Wechselrichter	311
4.3.3.	Anwendungsbeispiele	311
4.4.	Meßverfahren	313
4.4.1.	Meßverfahren für selbstgelöschte Wechselrichter	313
4.4.2.	Meßverfahren für Gleichstromsteller	314
4.5.	Übungsaufgaben	315
<b>5.</b>	<b>Steuerung der Stromrichter</b>	<b>317</b>
5.1.	Einführung	317
5.1.1.	Vorbetrachtung, Aufgaben des Steuergerätes	317
5.1.2.	Beschreibung der Steuergeräte mittels Zustandsgraphen	318
5.2.	Steueralgorithmen netzgelöschter Stromrichter	322
5.2.1.	Steueralgorithmus für die Zweipuls-Brückenschaltung	322
5.2.2.	Steuergrundgerät (SGG)	325
5.2.3.	Steuergeräte mehrphasiger Stromrichter	328
5.2.4.	Steueralgorithmen für Wechselstromsteller, Drehstromsteller und Schalter	328
5.2.4.1.	Steueralgorithmus des Wechselstromstellers	328
5.2.4.2.	Steueralgorithmus des Drehstromstellers	330
5.2.4.3.	Steueralgorithmen von Wechsel- und Drehstromschaltern	330
5.2.5.	Anpassung der Steuergeräte an reale Betriebsbedingungen	331
5.2.5.1.	Modifikationen der Zündpulsbildung	331
5.2.5.2.	Sperrung der Zündpulsausgabe	331
5.2.5.3.	Begrenzung des Verschieberegions des Zündwinkels	331
5.3.	Steueralgorithmen selbstgelöschter Stromrichter	332
5.3.1.	Steueralgorithmen für Gleichstromsteller	332
5.3.2.	Steueralgorithmen selbstgelöschter Wechselrichter	334
5.3.2.1.	Steueralgorithmen einphasiger Wechselrichter	334
5.3.2.2.	Steueralgorithmen dreiphasiger, selbstgelöschter Wechselrichter	339
5.4.	Aspekte der schaltungstechnischen Gestaltung der Steuergeräte	340
5.5.	Schaltungstechnik ausgewählter Baugruppen von Steuergeräten	342
5.5.1.	Synchronisationseinrichtungen	343
5.5.2.	Steuerbare Verzögerer	346
5.5.2.1.	Allgemeine Anforderungen	346
5.5.2.2.	Analoge Verzögerer	347
5.5.2.3.	Digitale Verzögerer	348
5.5.2.4.	Steuerung der Leitdauer der Ventile in selbstgelöschten Wechselrichtern	350
5.5.3.	Zündendstufen und Treiber	351
5.5.3.1.	Zündendstufen für Thyristoren	353
5.5.3.2.	Steuerimpulsgeneratoren für abschaltbare Thyristoren	359
5.5.3.3.	Treiber für bipolare Transistoren	360
5.5.3.4.	Treiber für MOS-Hochspannungs-Schalttransistoren	362
5.6.	Übungsaufgaben	364

<b>6. Stromrichtergeräte und -anlagen</b> .....	366
6.1. Netzurückwirkungen .....	366
6.1.1. Übersicht .....	366
6.1.2. Qualität der Netzspannung .....	366
6.1.3. Spannung am Anschlußpunkt ohne Kompensationseinrichtungen .....	367
6.1.3.1. Effektivwertabsenkung und -schwankung .....	367
6.1.3.2. Augenblicksabweichung der Netzspannung von ihrer Grundschiwingung .....	368
6.1.3.3. Amplitudenspektrum der Spannung am Anschlußpunkt .....	371
6.1.4. Verringerung der Netzurückwirkungen .....	371
6.1.4.1. Stromrichter mit verminderten Netzurückwirkungen .....	371
6.1.4.2. Kompensation der Blindleistung mit Leistungskondensatoren und Blindstromrichtern .....	372
6.1.4.3. Saugkreise .....	373
6.2. Kurzschlußströme .....	373
6.2.1. Kurzschlußarten und -kenngrößen .....	373
6.2.2. Berechnung der Kurzschlußströme .....	375
6.2.2.1. Dreipoliger Kurzschluß .....	375
6.2.2.2. Zweipoliger Kurzschluß .....	376
6.2.3. Kurzschlußimpedanzen .....	377
6.3. Schutzeinrichtungen, Funk-Entstörung, Parallel- und Reihenschaltung .....	378
6.3.1. Schutz für Dioden und Thyristoren .....	379
6.3.1.1. Überspannungen .....	379
6.3.1.2. Überströme .....	379
6.3.2. Schutz für Transistoren .....	380
6.3.3. Funk-Entstörung .....	381
6.3.4. Parallel- und Reihenschaltung .....	381
6.4. Gleichstromfilter .....	381
6.5. Konstruktive Formen .....	383
6.6. Beispiel zur Auslegung von Stromrichtern .....	387
<b>7. Antworten zu den Übungsaufgaben</b> .....	394
<b>8. Formelzeichen und Schaltzeichen</b> .....	413
8.1. Halbleiter-Leistungsbaulemente .....	413
8.2. Stromrichterschaltungen .....	414
8.3. Schaltzeichen .....	415
<b>9. Literaturverzeichnis</b> .....	416
<b>10. Sachwörterverzeichnis</b> .....	422