

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Was ist Leistungselektronik ?.....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Grundlagen.....</b>	<b>3</b>
2.1	Die elektrische Leitfähigkeit.....	3
2.1.1	Eigenleitung.....	5
2.1.2	Störstellenleitung.....	6
2.2	Der pn-Übergang.....	7
2.2.1	Der pn-Übergang mit äußerer Spannung.....	9
2.2.2	Der pn-Übergang im Durchlassbetrieb.....	9
2.2.3	Der pn-Übergang in Sperrrichtung beansprucht.....	11
2.2.4	Die Durchbruchmechanismen des pn-Überganges.....	12
2.2.5	Die optimale Gestaltung des pn-Übergangs.....	13
<b>3</b>	<b>Dioden.....</b>	<b>15</b>
3.1	pn-Diode.....	15
3.1.1	Modellbildung einer realen pn-Diode.....	16
3.1.2	Die Verlustleistungsberechnung.....	17
3.2	pin-Diode.....	18
3.2.1	Das Sperrverhalten.....	19
3.2.2	Das Durchlassverhalten.....	19
3.2.3	Das Schaltverhalten.....	21
3.2.3.1	Einschalten.....	22
3.2.3.2	Ausschalten.....	22
3.2.3.3	Schaltverluste.....	24
3.2.4	Reihenschaltung.....	26
3.2.5	Parallelschaltung.....	27
3.2.6	Einsatzkriterien für Dioden.....	29
3.3	Solarzelle.....	30
<b>4</b>	<b>Transistoren.....</b>	<b>33</b>
4.1	Bipolartransistor.....	33
4.1.1	Aufbau.....	33
4.1.2	Wirkungsweise.....	34
4.1.3	Schaltverluste.....	36

4.1.4	Der bipolare Leistungstransistor.....	38
4.1.5	Die Arbeitspunkte des bipolaren Transistorschalters.....	39
4.1.6	Nichtsättigungsbetrieb (aktiver Bereich, $u_{BC} < 0$ ).....	39
4.1.7	Quasisättigungsbetrieb ( $u_{BC} > 0$ ).....	40
4.1.8	Übersättigungsbetrieb.....	40
4.1.9	Darlington-Transistoren.....	42
4.1.10	Vergleich Bipolartransistor - Schalter .....	43
4.2	Betriebsarten .....	44
4.2.1	Schalten einer ohmsch-induktiven Last.....	45
4.2.2	Schalten eines eingepprägten Stromes.....	48
4.2.2.1	Weiches Schalten.....	48
4.2.2.2	Hartes Schalten.....	49
4.2.3	RCD-Beschaltung.....	50
4.3	Der IG-Feldeffekttransistor (MOSFET).....	51
4.3.1	Aufbau.....	51
4.3.2	Die Kennlinie.....	55
4.3.3	Die Gatekapazität.....	56
4.3.4	Neuere Entwicklungsrichtungen.....	57
4.4	Der IG-Bipolar Transistor (IGBT).....	58
4.4.1	Aufbau.....	58
4.4.2	Durchlasseigenschaften.....	59
4.4.3	Das Schaltverhalten.....	60
4.4.3.1	Einschalten.....	60
4.4.3.2	Ausschalten.....	62
4.4.4	Sperr- und Blockierverhalten.....	64
4.4.5	Neuere Entwicklungsrichtungen.....	65
4.5	Treiberschaltungen .....	66
4.5.1	Gateanschluss.....	69
4.5.2	Ausführung einer Ansteuerung für einen IGBT .....	70
4.5.2.1	Ansteuerung eines Halbbrückenmoduls.....	71
4.5.2.2	Impulslogik.....	72
4.5.2.3	Ventilbelastung.....	74
4.6	Aufbau- und Verbindungstechnik.....	75
4.6.1	Problematik.....	75
4.6.2	Gehäuseformen.....	76
4.6.2.1	Diskrete Bauelemente.....	76
4.6.2.2	IGBT-Leistungsmodule.....	77

4.6.3	Eigenschaften von Leistungsmodulen.....	78
4.6.3.1	Lastwechselfestigkeit .....	78
4.6.3.2	Verhalten bei Moduldefekt .....	80
4.6.3.3	Parasitäre Induktivitäten.....	80
4.6.3.4	EMV-Verhalten.....	80
<b>5</b>	<b>Thyristoren.....</b>	<b>81</b>
5.1	Aufbau und Wirkungsweise.....	81
5.2	Kennlinie.....	83
5.3	Das Einschaltverhalten.....	83
5.3.1	Überschreiten der zulässigen Blockierspannung.....	83
5.3.2	Überschreiten der zulässigen Spannungsteilheit .....	84
5.3.3	Gatestromzündung.....	84
5.4	Ausschalten.....	87
5.4.1	Netzgeführter Betrieb.....	87
5.4.2	Selbstgeführter Betrieb.....	87
5.5	Ausführungsformen.....	90
5.5.1	Amplifying Gate Struktur.....	90
5.5.2	Zweirichtungs-Thyristoren.....	90
5.5.3	Der asymmetrisch sperrende Thyristor.....	91
5.5.4	Der lichtzündbare Thyristor.....	91
5.6	Abschaltbarer Thyristor (GTO).....	91
5.6.1	Der asymmetrische sperrende GTO.....	91
5.6.2	Ansteuerung.....	92
5.6.2.1	Einschalten.....	92
5.6.2.2	Ausschalten.....	92
5.6.3	Betriebsbedingungen für einen GTO.....	93
5.6.4	Der IGCT.....	94
5.7	Auswahl von Leistungsbauerelementen.....	94
<b>6</b>	<b>Wärme-Management.....</b>	<b>95</b>
6.1	Die Verlustleistung.....	95
6.2	Das thermische Ersatzschaltbild.....	97
6.2.1	Der innere Wärmewiderstand $R_{th,JC}$ .....	98
6.2.2	Der äußere Wärmewiderstand $R_{th,CA}$ .....	98
6.2.3	Die Wärmekapazität $C_{th}$ .....	99
6.2.4	Der Wärmewiderstand des Kühlkörpers.....	100

6.3	Kühlmedien.....	102
6.3.1	Luftkühlung.....	102
6.3.2	Wasserkühlung.....	103
6.3.3	Siedekühlung.....	103
<b>7</b>	<b>Stromrichterschaltungen.....</b>	<b>105</b>
7.1	Grundfunktionen.....	105
7.2	Kennzeichnung von Stromrichterschaltungen.....	105
7.3	Einteilung nach der inneren Wirkungsweise.....	106
7.4	Leistungssterverfahren.....	107
7.5	Mittelpunktschaltung M1.....	107
7.5.1	Transformator-Bauleistung.....	111
7.5.2	Kapazitive Last.....	112
7.5.3	Ohmsch-induktive Last.....	114
7.5.4	Ohmsch-induktive Last mit Freilaufdiode.....	115
7.6	Wechselwegschaltung W1.....	116
7.6.1	Stellerbetrieb mit ohmscher Last.....	117
7.6.2	Stellerbetrieb mit ohmsch-induktiver Last .....	119
7.6.3	Schaltbetrieb mit ohmsch-induktiver Last.....	120
<b>8</b>	<b>Wechselstromschaltungen.....</b>	<b>121</b>
8.1	Die Mittelpunktschaltung M2U.....	121
8.1.1	Gleichspannungsbildung.....	121
8.2	Die gesteuerte Mittelpunktschaltung M2C.....	122
8.2.1	Die Wirkungsweise des Steuergenerators.....	122
8.2.2	Passive Last.....	123
8.2.2.1	Ohmsche Last.....	123
8.2.2.2	Ohmsch-induktive Last .....	124
8.2.3	Aktive Last.....	126
8.2.4	Ventilbelastung .....	129
8.2.5	Trafo- und Netzgrößen.....	130
8.2.6	Bemessung einer Glättungsinduktivität.....	131
8.2.7	Die Kommutierung.....	133
8.2.7.1	Überlappung.....	134
8.2.7.2	Die induktive Gleichspannungsänderung.....	136
8.3	Die Brückenschaltung B2.....	139
8.3.1	Ventilbelastung.....	140

---

8.3.2	Transformatorbauleistung.....	140
<b>9</b>	<b>Drehstromschaltungen.....</b>	<b>141</b>
9.1	Die Mittelpunktschaltung M3.....	141
9.1.1	Gleichspannungsbildung.....	142
9.1.1.1	Ohmsche Last .....	143
9.1.1.2	Aktive Last.....	145
9.1.2	Ventilbelastung.....	146
9.1.2.1	Spannung.....	146
9.1.2.2	Strom.....	148
9.1.3	Netzstrom.....	149
9.1.4	Die Kommutierung .....	150
9.1.4.1	Einfluss auf die Gleichspannung.....	151
9.1.4.2	Berechnung des induktiven Gleichspannungsabfalls.....	153
9.1.4.3	Kommutierungseinfluss auf die Ventilspannung.....	155
9.2	Die Brückenschaltung B6.....	156
9.2.1	Gleichspannungsbildung.....	156
9.2.2	Leitzustände der Ventile.....	157
9.2.3	Stromrichtereingangsstrom.....	159
9.2.4	Netzstrom.....	159
9.2.5	Bauleistung des Transformators.....	160
9.3	Zündimpulse.....	161
9.3.1	Gleichspannungsbildung.....	163
9.3.2	Einfluss der Kommutierungen.....	165
9.3.3	Auswirkungen nicht idealer Glättung auf die Gleichspannung.....	169
9.4	12-pulsige Schaltungen .....	170
9.4.1	Stromrichter-Reihenschaltung.....	171
9.4.2	Stromrichter-Parallelschaltung.....	172
9.5	Höherpulsige Schaltungen.....	174
<b>10</b>	<b>Netzurückwirkungen.....</b>	<b>175</b>
10.1	Blindleistungsverhalten.....	175
10.1.1	Die Kennlinie der Steuerblindleistung.....	176
10.1.2	Oberschwingungsblindleistung.....	177
10.2	Stromüberschwingungen.....	178
10.2.1	Stromglättung.....	178
10.2.2	Spannungsglättung.....	181

10.2.2.1	Passive PFC-Schaltung.....	183
10.2.2.2	Aktive PFC-Schaltung.....	184
10.3	Spannungsüberschwingungen.....	187
10.3.1	B2-Schaltung.....	187
10.3.2	B6-Schaltung .....	189
<b>11</b>	<b>Lastgeführte Stromrichter.....</b>	<b>195</b>
11.1	Schwingkreiswechselrichter.....	195
11.1.1	Betrieb mit eingprägter Gleichspannung .....	195
11.1.2	Betrieb mit eingprägtem Gleichstrom .....	198
11.1.3	Vergleich der Wechselrichtertypen.....	200
11.2	Schwingkreiswechselrichter mit abschaltbaren Ventilen.....	200
11.2.1	Strom- und spannungsloses Schalten.....	202
11.2.2	Anwendungsbeispiel zum stromlosen Schalten (ZCS).....	203
<b>12</b>	<b>Selbstgeführte Stromrichter.....</b>	<b>205</b>
12.1	Wechselrichter mit eingprägter Spannung (UWR).....	205
12.1.1	Mittelpunktschaltung mit AC-seitigem Mittelpunkt .....	206
12.1.2	Ausführungsbeispiel mit Thyristorschalter.....	207
12.1.3	3-phasige Brückenschaltungen.....	210
12.1.3.1	Betrieb mit passiver Last .....	212
12.1.3.2	Betrieb mit einer Drehfeldmaschine.....	212
12.1.3.3	Wechselrichter mit Phasenfolgelöschung.....	214
12.2	Wechselrichter mit eingprägtem Strom (IWR).....	216
12.2.1	Prinzip.....	216
12.2.2	Wechselrichter mit Phasenfolgelöschung.....	219
<b>13</b>	<b>Die Wirkungsweise selbstgeführter UWR.....</b>	<b>223</b>
13.1	Schaltungen in Zweipunkttechnik (2-level-inverter).....	224
13.1.1	Schaltfunktionen.....	225
13.1.2	Kurzzeit-Mittelwert.....	226
13.1.3	Der Modulator.....	228
13.1.4	Modulationsfunktion .....	228
13.1.5	Aussteuerung.....	229
13.1.6	1-phasige Brücke .....	230
13.1.6.1	Grundfrequenztaktung.....	231
13.1.6.2	Schwenksteuerung.....	232

13.1.6.3	Pulsbreitenmodulation.....	233
13.1.7	3-phasige Brücke.....	234
13.1.7.1	Die Spannungsbildung.....	235
13.1.7.2	Der Zwischenkreisstrom .....	238
13.2	Schaltungen in Dreipunkttechnik (3-level-inverter).....	242
13.2.1	1-phasige Brückenschaltung.....	245
13.2.2	3-phasige Brückenschaltung.....	246
13.3	Multi-level-Schaltungen.....	249
<b>14</b>	<b>Drehstromgrößen in Raumzeigerdarstellung.....</b>	<b>251</b>
14.1	Raumzeigertransformation.....	251
14.2	Stromrichterspeisung.....	255
<b>15</b>	<b>Steuerverfahren für UWR.....</b>	<b>257</b>
15.1	Begriffe.....	257
15.2	Die Grundfrequenzsteuerung.....	262
15.3	Die Pulsbreitenmodulation (PWM).....	263
15.3.1	Digitale Schaltungen.....	266
15.3.2	Schaltfunktionen für 3-phasige Schaltungen.....	267
15.3.3	Steuerkennlinie.....	270
15.3.4	Off-line optimierte Schaltfunktionen.....	272
15.3.5	Eliminationsmethode .....	272
15.3.6	Optimierte Pulsmuster.....	273
15.3.7	Raumzeigermodulation.....	274
<b>16</b>	<b>Stromrichter und Maschinen.....</b>	<b>277</b>
16.1	Gleichstrommaschinen.....	277
16.2	Elektronikmotor.....	280
16.3	Stromrichtermotor.....	281
16.4	Drehfeldmaschinen.....	284
16.5	Zusatzverluste durch Stromrichterspeisung.....	288
16.6	Leistungssteuerung bei konstanter Ständerfrequenz.....	289
16.6.1	Drehstromsteller W3.....	290
16.6.2	Pulsgesteuerter Läuferwiderstand.....	291
16.6.3	Stromrichtererkaskade.....	292
16.6.3.1	Ausführung mit Stromzwischenkreis.....	293
16.6.3.2	Ausführung mit Spannungszwischenkreis.....	294
16.7	Leistungssteuerung bei variabler Ständerfrequenz.....	296

16.7.1	Prinzip des Direktumrichters.....	296
16.7.2	3-phasiger Direktumrichter.....	299
16.7.3	Frequenzumrichter.....	299
16.7.3.1	U/f-Kennliniensteuerung.....	302
16.7.3.2	Feldorientierte Regelung.....	303
16.7.4	Abschätzung der Zwischenkreisgrößen.....	305
16.8	Energieeffizienz von elektrischen Antrieben.....	307
<b>17</b>	<b>Leistungselektronik und EMV.....</b>	<b>311</b>
17.1	Grundbegriffe.....	311
17.1.1	Störgrößen in der Leistungselektronik.....	312
17.1.2	Störfestigkeit.....	314
17.1.3	Störvermögen.....	314
17.1.4	Leitungsgebundene Störungen.....	314
17.1.5	Nicht leitungsgebundene Störungen.....	314
17.1.5.1	Kapazitive Beeinflussungen.....	314
17.1.5.2	Induktive Beeinflussungen.....	315
17.1.5.3	Elektromagnetische Beeinflussungen.....	315
17.1.6	Psophometrischer Störstrom.....	316
17.2	Netzfilter.....	316
17.3	Motoranpassung an den Stromrichter.....	320
17.3.1	Lagerströme.....	320
17.3.2	Wanderwellenprobleme.....	320
17.3.3	Ausgangsfilter.....	323
17.4	Weitere Maßnahmen.....	324
<b>18</b>	<b>Gleichspannungswandler.....</b>	<b>327</b>
18.1	Tiefsetzsteller.....	327
18.2	Ausführungsbeispiel zum Tiefsetzsteller.....	327
18.3	Gleichstromsteller.....	328
18.4	Gleichstromsteller mit aktiver Last.....	331
18.5	Lückbetrieb.....	333
18.6	Hochsetzsteller.....	336
18.7	Hoch-Tiefsetzsteller.....	337
18.8	Sperrwandler.....	339
18.9	Durchflusswandler.....	340
18.10	Schaltnetzeile.....	341
18.10.1	Sekundär getaktetes Netzteil (AC-DC-Wandler).....	342



---

18.10.2	Primär getaktetes Netzteil (AC-DC-Wandler).....	342
18.10.3	Elektronischer Transformator (AC-AC-Wandler).....	343
18.10.4	Pulsleichrichter.....	343
18.10.5	Energiesparlampen.....	345
18.10.5.1	Kompakt Leuchtstofflampe.....	345
18.10.5.1	Leuchtdiode (LED).....	346
<b>19</b>	<b>Stromversorgungen.....</b>	<b>347</b>
19.1	Unterbrechungsfreie Stromversorgungen.....	347
19.1.1	Online-Systeme.....	348
19.1.2	Offline-Systeme.....	348
19.2	Photovoltaische Stromversorgungen.....	349
19.3	Brennstoffzellen-Stromversorgungen.....	349
19.4	Energiespeicher.....	351
19.4.1	Konzepte für akkugestützte Fahrzeugantriebe.....	356
19.4.2	Speichertechnologien für Elektrofahrzeuge.....	357
	<b>Formelzeichen.....</b>	<b>361</b>
	<b>Weiterführende Literatur.....</b>	<b>364</b>
	<b>Sachwortverzeichnis.....</b>	<b>366</b>