

# Leistungselektronik

Ein Handbuch Band 1 / Band 2

Bearbeitet von  
Franz Zach

5. überarbeitete und erweiterte Auflage 2016. Buch. CXL, 2877 S. Hardcover

ISBN 978 3 658 04898 3

Format (B x L): 16,8 x 24 cm

[Weitere Fachgebiete > Technik > Elektronik > Leistungselektronik](#)

Zu [Leseprobe](#)

schnell und portofrei erhältlich bei

  
DIE FACHBUCHHANDLUNG

Die Online-Fachbuchhandlung [beck-shop.de](http://beck-shop.de) ist spezialisiert auf Fachbücher, insbesondere Recht, Steuern und Wirtschaft. Im Sortiment finden Sie alle Medien (Bücher, Zeitschriften, CDs, eBooks, etc.) aller Verlage. Ergänzt wird das Programm durch Services wie Neuerscheinungsdienst oder Zusammenstellungen von Büchern zu Sonderpreisen. Der Shop führt mehr als 8 Millionen Produkte.

# Inhaltsverzeichnis Band 1

<b>Wichtige Formelzeichen, Abkürzungen und Symbole</b> . . . . .	<b>LXV</b>
<b>1. Einleitung</b> . . . . .	<b>1</b>
1.1 Grundprinzipien der Leistungselektronik . . . . .	1
1.2 Stellung der Leistungselektronik in der Elektrotechnik und Anwendungsgebiete . . . . .	2
1.3 Methoden der Leistungselektronik . . . . .	3
1.4 Einteilung der leistungselektronischen Schaltungen . . . . .	3
1.5 Historisches . . . . .	3
1.6 Aufbau und Organisation des vorliegenden Werkes . . . . .	4
<b>2. Mathematische und elektrotechnische Grundlagen</b> . . . . .	<b>6</b>
2.1 Mathematische Grundlagen . . . . .	6
2.1.1 Fouriersche Reihen . . . . .	6
2.1.1.1 Allgemeine Formeln . . . . .	6
2.1.1.2 Spezielle Funktionen bzw. Symmetrien . . . . .	9
2.1.1.3 Wichtige Fourierreihen . . . . .	13
2.1.1.3.1 Allgemeine Verläufe . . . . .	13
2.1.1.3.2 Spezielle Funktionen der Leistungselektronik . . . . .	18
A. Primärstrom einer zweipulsigen Schaltung . . . . .	18
B. Primärstrom einer dreipulsigen Schaltung . . . . .	19
C. Typischer Strom einer sechspulsigen Brückenschaltung . . . . .	21
D. Stromverlauf aus Sinus-Kuppen . . . . .	22
E. Stromverlauf aus Trapez-Impulsen . . . . .	25
F. Primärstrom einer sechspulsigen Mittelpunktschaltung . . . . .	27
G. Lastspannung bei Einweggleichrichtung mit Freilaufdiode bzw. bei rein ohmscher Last . . . . .	28
H. Lastspannung bei Zweiweggleichrichtung mit Freilaufdiode bzw. rein ohmscher Last . . . . .	31
I. Lastspannung bei Zweiweggleichrichtung (zweipulsig) und für allgemeine Pulszahl $p$ sowie Lastinduktivität $\rightarrow \infty$ ; keine Freilaufdiode . . . . .	34
J. Lastspannung im dreipulsigen Fall (keine Freilaufdiode, Lastinduktivität $\rightarrow \infty$ ) . . . . .	41
K. Lastspannung im sechspulsigen Fall (keine Freilaufdiode, Lastinduktivität $\rightarrow \infty$ ) . . . . .	43
L. Spannungseinbrüche bei Kommutierungen . . . . .	45
2.1.1.4 Ergänzende Bemerkungen zu den Fourierschen Reihen . . . . .	47
A. Zusammengesetzte Funktionen . . . . .	47
B. Fast-Fourier-Transformation . . . . .	49
C. Bildung neuer Funktionen durch Verschiebung in Richtung Ordinate oder Abszisse . . . . .	49
D. Weitere spezielle Fourierreihen . . . . .	49

2.1.2	Laplacetransformation . . . . .	49
2.1.3	Geometrische Reihen, exponentielle Verläufe und quadratische Gleichungen . .	50
2.1.4	Berechnung von Schaltungen der Leistungselektronik . . . . .	51
2.2	Elektrotechnische Grundlagen . . . . .	55
2.2.1	Allgemeines . . . . .	55
2.2.2	Spannungen und elektromotorische Kräfte (Zählpfeile und Definitionen) . . . .	55
2.2.3	Transformatoren . . . . .	56
2.2.4	Drehstromsysteme – Verhalten bei Oberschwingungen . . . . .	57
2.2.5	Leistungsarten und Kennwerte nichtsinusförmiger Ströme und Spannungen . .	59
	A. Effektivwerte . . . . .	59
	B. Wirkleistungen . . . . .	61
	C. Kennwerte . . . . .	62
	a) Scheitelfaktor . . . . .	62
	b) Formfaktor . . . . .	62
	c) Oberschwingungsgehalt . . . . .	62
	d) Grundschwingungsgehalt . . . . .	62
	e) Welligkeit . . . . .	62
	D. Leistungsbilanz und Leistungsarten Oberschwingungsbehafteter Ströme und Spannungen . . . . .	63
2.2.6	Kennwerte bei nichtsinusförmigem Strom und sinusförmiger Spannung; Leistungsfaktor und Verschiebungsfaktor . . . . .	68
2.3	Literatur . . . . .	70
	Anhang 2A. Winkelfunktionen – Additionstheoreme . . . . .	72
<b>3.</b>	<b>Bauelemente der Leistungselektronik . . . . .</b>	<b>73</b>
3.1	Allgemeines . . . . .	73
3.2	Einführung in die Grundbegriffe der Halbleitertechnik . . . . .	73
	a) Eigenleitung . . . . .	74
	b) Störstellenleitung . . . . .	74
3.3	Diode . . . . .	74
3.3.1	Statisches Verhalten . . . . .	75
	a) p–n-Übergang ohne angelegte Spannung . . . . .	75
	b) p–n-Übergang mit außen in Durchlaßrichtung angelegter Spannung . . . . .	76
	c) p–n-Übergang mit außen in Sperrichtung angelegter Spannung . . . . .	76
3.3.2	Dynamisches Verhalten . . . . .	77
	a) Sperrschichtkapazität . . . . .	77
	b) Diffusionskapazität (Kapazität einer leitenden Diode) . . . . .	77
3.3.3	Abhängigkeiten von der Temperatur . . . . .	78
	a) Temperaturabhängigkeit des Sperrstromes . . . . .	78
	b) Temperaturabhängigkeit der Durchlaßspannung . . . . .	78
3.4	Transistoren . . . . .	79
3.4.1	Aufbau und Wirkungsweise . . . . .	79
3.4.2	Stromverstärkung . . . . .	80
3.4.3	Kennlinienfeld . . . . .	81
3.4.4	Grenzdaten von Transistoren und Kühlung . . . . .	83
	3.4.4.1 Spannungsgrenzen . . . . .	83
	a) Durchbruch 1. Art . . . . .	83
	b) Punch Through . . . . .	83
	c) Durchbruch 2. Art (Second Breakdown) . . . . .	83
	3.4.4.2 Stromgrenze . . . . .	83
	3.4.4.3 Leistungsgrenze . . . . .	84
	3.4.4.4 Kühlung . . . . .	84

3.4.4.5	Grenzdaten bei Schalt- oder Impulsbetrieb	85
3.4.4.6	Zusammenstellung der Grenzwerte	86
3.4.4.7	Lebensdauer des Leistungstransistors	87
3.4.5	Parallelschaltung und Verluste	87
3.4.5.1	Aufteilung des Gesamtstromes	87
3.4.5.2	Stromverstärkungsverlauf und minimale Steuer- und Durchlaßverluste	88
3.4.6	Zeitliches Schaltverhalten	88
3.4.7	Transistoren für höhere Spannungen	89
3.5	Thyristoren	92
3.5.1	Aufbau und Wirkungsweise	92
3.5.2	Statisches Verhalten und Zündung	94
3.5.2.1	Sperrzustand in Rückwärtsrichtung	94
3.5.2.2	Sperrzustand in Vorwärtsrichtung (Blockierzustand)	95
3.5.2.3	Durchlaßzustand	97
3.5.2.4	Zündvorgang und Eingangskennlinie	97
3.5.2.5	Empfohlene Steuerdaten	99
3.5.3	Dynamisches Verhalten; Schaltvorgänge	100
3.5.3.1	Große Spannungssteilheit in Vorwärtsrichtung	100
3.5.3.2	Einschaltvorgang und hohes $di/dt$	100
a)	Zündverzugszeit $t_{gd}$	100
b)	Durchschaltzeit $t_{gr}$	101
c)	Zündausbreitungszeit $t_{gs}$ (auch $t_{sp}$ )	101
3.5.3.3	Ausschaltvorgang – Freierdezeit	102
a)	Spannungsnachlaufzeit $t_s$	103
b)	Freierdezeit $t_q$	103
3.5.3.3.1	Spannungsnachlaufzeit $t_s$ – Rückstrom $i_R$	104
3.5.3.3.2	Freierdezeit $t_q$	104
3.5.4	Thermisches Verhalten – Verlustleistung	105
3.5.4.1	Statische Verluste	105
3.5.4.2	Dynamische Verluste	105
3.5.4.3	Ermittlung des Temperaturverlaufs und Kühlung	106
3.5.5	Beschaltung von Thyristoren	107
3.5.5.1	Dämpfung der Ausschaltüberspannungen (TSE-Beschaltung)	107
3.5.5.2	Serienschaltung von Thyristoren	111
3.5.5.3	Parallelschaltung von Thyristoren	113
3.5.5.4	Überstrom- und Überspannungsschutz	113
3.5.6	Grenzkennlinien	117
3.5.7	Bauformen	119
3.5.8	Technologische Verbesserungen	120
3.5.8.1	Amplifying Gate [größeres $(di/dt)_{max}$ ]	120
3.5.8.2	Querfeldemitter	121
3.5.8.3	Shorted Emitter	122
3.5.8.4	$pin$ -Übergänge, Kantenabschrägung (Erhöhung der Sperrspannung)	123
3.6	Vergleich von Transistor und Thyristor	123
3.6.1	Unterschiede im Aufbau und im statischen Betrieb	123
3.6.2	Unterschiede im Schaltbetrieb	124
3.6.3	Unterschiede in den dynamischen Grenzwerten und bei Überlastung	125
3.6.4	Weitere Unterschiede	125
3.6.5	Zusammenfassung	125
3.7	Weitere (klassische) Bauelemente der Leistungselektronik	126
3.7.1	Unijunction-Transistor (Doppelbasisdiode)	126
3.7.2	Triac	127

3.7.3	Diac, Glimmlampe . . . . .	128
3.8	Literatur . . . . .	128
<b>4.</b>	<b>Leistungsteil leistungselektronischer Schaltungen . . . . .</b>	<b>131</b>
4.1	Klassifikation leistungselektronischer Schaltungen . . . . .	131
4.1.1	Allgemeines . . . . .	131
4.1.2	Einteilungsgrundsätze leistungselektronischer Schaltungen . . . . .	131
A.	Klassifizierung nach DIN . . . . .	131
a)	Klassifikation nach der Führung, d. h. nach der Herkunft der Kommutierungsspannung . . . . .	131
b)	Klassifikation nach der Herkunft der Taktfrequenz . . . . .	133
c)	Klassifikation nach der Art der Energieumwandlung . . . . .	133
B.	Klassifikation nach General Electric . . . . .	133
C.	Unterscheidung nach den verwendeten elektrischen Schaltelementen . . . . .	134
D.	Klassifikation nach Anwendungsgebieten, Leistungsbereichen etc. . . . .	134
4.2	Fremdgeführte Schaltungen . . . . .	134
4.2.1	Allgemeines . . . . .	134
4.2.2	Netzgeführte Schaltungen . . . . .	135
4.2.2.1	Grundbegriffe zur Arbeitsweise netzgeführter Schaltungen . . . . .	135
4.2.2.1.1	Löschung . . . . .	135
4.2.2.1.2	Zündverzögerung und Kommutierung . . . . .	136
4.2.2.1.3	Grundlegende Betriebsfälle . . . . .	142
a)	Rein ohmsche Last . . . . .	142
b)	Ohmsche Last und Gegenspannung . . . . .	143
c)	Induktivität als Last . . . . .	145
d)	Kapazität als Last . . . . .	147
e)	Induktivitäten $L_a$ in den Ventilzweigen . . . . .	150
f)	Gegenspannung im verketteten Kreis unter Berücksichtigung der Induktivitäten $L_a$ . . . . .	152
g)	Ohmscher Widerstand und Induktivität als Last . . . . .	155
4.2.2.1.4	Überlappung . . . . .	161
4.2.2.2	Anschnittsteuerung: Gleich- und Wechselrichterbetrieb; Überlappung . . . . .	161
4.2.2.2.1	Prinzipielles zur Spannungssteuerung . . . . .	161
4.2.2.2.2	Steuerungskennlinien bei Anschnittsteuerung für $p = 2$ . . . . .	163
a)	Rein ohmsche Last . . . . .	163
b)	Ohmsch-induktive und rein induktive Last . . . . .	164
4.2.2.2.3	Lückender und nichtlückender Betrieb und Steuerungsgesetze für $p > 2$ . . . . .	164
4.2.2.2.4	Wechselrichterbetrieb bei Netzführung . . . . .	167
4.2.2.2.5	Überlappung . . . . .	170
4.2.2.2.6	Innere Spannungsabfälle . . . . .	178
4.2.2.3	Grundlegende Arten von netzgeführten Schaltungen . . . . .	180
4.2.2.3.1	Mittelpunktschaltungen . . . . .	180
4.2.2.3.2	Brückenschaltungen . . . . .	182
A.	Vollgesteuerte Brücken . . . . .	182
a)	Einphasiges System . . . . .	182
b)	Dreiphasiges System . . . . .	184
B.	Halbgesteuerte Brücken . . . . .	188
a)	Einphasiges System mit symmetrischer Steuerung . . . . .	188
b)	Einphasiges System mit unsymmetrischer Steuerung . . . . .	191
c)	Halbgesteuerte Dreiphasen-Brückenschaltung . . . . .	192
4.2.2.3.3	Saugdrosselschaltung . . . . .	194

4.2.2.3.4	Wechselstrom- sowie Drehstromschalter und -steller . . . . .	200
	Wechselstromsteller . . . . .	202
	Drehstromsteller . . . . .	203
	Wechsel- und Drehstromschalter . . . . .	209
4.2.2.4	Spezielle Probleme der Schaltungen mit Netzführung . . . . .	210
	A. Sperrspannungen an den elektrischen Ventilen . . . . .	210
	B. Überstrom- und Kurzschlußverhalten . . . . .	214
	a) Schaltung M3 ungesteuert . . . . .	214
	b) Schaltung M3 gesteuert . . . . .	215
	c) Schaltung B6 ungesteuert . . . . .	215
	d) Schaltung B6 gesteuert . . . . .	217
	C. Betriebskennlinien (äußere Charakteristik) . . . . .	223
	D. Kippung . . . . .	236
4.2.3	Lastgeführte Schaltungen . . . . .	237
4.3	Selbstgeführte Schaltungen . . . . .	246
4.3.1	Allgemeines . . . . .	246
4.3.2	Gleichstromsteller . . . . .	247
4.3.2.1	Prinzipielle Wirkungsweise . . . . .	247
	a) Keine Zuleitungsinduktivität . . . . .	251
	b) Berücksichtigung der Zuleitungsinduktivität $L_e$ . . . . .	252
4.3.2.2	Anordnung von Löschsaltungen . . . . .	255
4.3.2.3	Weitere Löschsaltungen und Erweiterungen . . . . .	257
4.3.2.3.1	Allgemeines . . . . .	257
4.3.2.3.2	Systematik der Löschsaltungen . . . . .	257
	A. Schaltungen mit nur einem Thyristor . . . . .	257
	a) Löschung mit Hilfe einer (z. B. externen) Wechselspannungs- quelle – Schaltung mit nur einem Thyristor . . . . .	257
	b) Löschung mit Hilfe von Schwingkreisen . . . . .	258
	B. Schaltungen mit mehreren Thyristoren . . . . .	259
	a) Schaltungen mit Löschthyristoren . . . . .	259
	b) Schaltungen mit mehreren Hauptthyristoren . . . . .	262
4.3.2.3.3	Schaltungstechnische Erweiterungen und Verbesserungen der Löschsaltungen . . . . .	264
4.3.2.4	Energierückgewinnung . . . . .	267
4.3.2.5	Zwei- und Vierquadrantensteller, Prinzip des selbstgeführten Wechsel- richters . . . . .	269
	a) Zweiquadrantensteller . . . . .	269
	b) Vierquadrantensteller . . . . .	270
4.3.2.6	Pulsgesteuerter Widerstand . . . . .	272
4.3.2.7	Einschaltprobleme bei Gleichstromstellern bzw. bei Löschsaltungen . . . . .	272
4.3.3	Selbstgeführte Wechselrichter, Pulswechselrichter . . . . .	273
4.3.3.1	Allgemeines . . . . .	273
4.3.3.2	Einphasige Schaltungen . . . . .	274
4.3.3.2.1	Mittelpunktschaltungen . . . . .	274
	a) Prinzipielle Wirkungsweise . . . . .	274
	b) Prinzipielles zur Kommutierung: Folgelöschung und Einzellöschung . . . . .	280
	c) Weitere Details zur Folgelöschung . . . . .	282
	c1) Rückarbeitsdioden . . . . .	282
	c2) Sperrdioden . . . . .	288
4.3.3.2.2	Brückenschaltungen . . . . .	288
	A. Einzellöschung . . . . .	288
	a) Treiben . . . . .	289

b) Umschalten von Treiben auf Freilauf . . . . .	290
c) Umschalten von Treiben auf Gegenspannung . . . . .	290
B. Folgelöschung . . . . .	292
4.3.3.3 Dreiphasige Wechselrichter . . . . .	293
4.3.3.3.1 Allgemeines . . . . .	293
4.3.3.3.2 Phasenfolgelöschung . . . . .	294
4.3.3.3.3 Spannungsverläufe . . . . .	298
a) 120°-Leitbereitschaft . . . . .	299
a1) Rein ohmsche Last . . . . .	299
a2) Ohmsch-induktive Last . . . . .	300
b) 180°-Leitbereitschaft . . . . .	309
4.3.3.3.4 Einzellöschung . . . . .	309
4.3.3.3.5 Belastung durch Wechselstrommotoren . . . . .	311
4.3.3.3.6 Steuerung der Ausgangsspannung . . . . .	316
4.3.3.3.7 Zwischenkreise, Umrichter . . . . .	316
4.3.3.3.8 (Spannungs-)Wechselrichter (Umrichter) mit steuerbarer Zwischenkreisspannung . . . . .	317
a) Allgemeines und Phasenfolgelöschung . . . . .	317
b) Phasenlöschung . . . . .	320
4.3.3.3.9 (Puls-)Wechselrichter (Umrichter) mit konstanter Zwischenkreisspannung (Puls-Spannungswechselrichter) . . . . .	323
4.3.3.3.10 Wechselrichter (Umrichter) mit Gleichstromzwischenkreis (Stromwechselrichter) . . . . .	323
4.3.3.3.11 Vergleich von Spannungswechselrichtern und Stromwechselrichtern sowie Zusammenfassung . . . . .	326
I) Zusammenfassung der Eigenschaften selbstgeführter Wechselrichter im allgemeinen . . . . .	326
1. Stromwechselrichter . . . . .	327
A. Eigenschaften . . . . .	327
B. Schaltungstechnik (Strukturen) und Steuerung der Ausgangsspannung . . . . .	327
a) Schaltungsstrukturen . . . . .	327
b) Ausgangsspannungssteuerung . . . . .	328
C. Vorteile . . . . .	328
D. Nachteile . . . . .	329
2. Spannungswechselrichter . . . . .	329
A. Eigenschaften . . . . .	329
B. Schaltungstechnik (Strukturen) und Steuerung der Ausgangsspannung . . . . .	330
a) Schaltungsstrukturen . . . . .	330
b) Ausgangsspannungssteuerung . . . . .	330
C. Vorteile . . . . .	330
D. Nachteile . . . . .	330
II) Speziellere Aussagen zu den Zwischenkreiswechselrichtern . . . . .	330
Löschungsarten . . . . .	331
4.3.3.3.12 Betriebskennlinien selbstgeführter Schaltungen . . . . .	332
4.4 Literatur . . . . .	333
Anhang 4A. Dimensionierungsvergleich für Antriebe mit und ohne Leistungselektronik . . . . .	335
4A.1 Allgemeines . . . . .	335
4A.2 Momenten-/Zeit- bzw. Drehzahl-/Zeit-Verlauf . . . . .	336
4A.3 Asynchronmotor und Ventilator mit verstellbaren Flügeln . . . . .	336
a) Wahl des Motors . . . . .	336

b)	Allgemeine Bestimmung der Leistungen und Verluste . . . . .	337
c)	Numerische Auswertung . . . . .	338
4A.4	Gleichstrommotor und Ventilator mit feststehenden Flügeln . . . . .	343
a)	Wahl des Motors . . . . .	343
b)	Allgemeine Bestimmung der Leistungen und Verluste . . . . .	344
c)	Numerische Auswertung . . . . .	348
4A.5	Berechnung der Blindleistungen für beide Motoren . . . . .	353
a)	Asynchronmotor . . . . .	353
b)	Gleichstrommotor . . . . .	354
4A.6	Zusammenfassung . . . . .	355
Anhang 4B.	Mindestzeiten bei Löschsaltungen . . . . .	355
a)	Schaltung nach Abb. 4.91 . . . . .	355
b)	Schaltung nach Abb. 4.88a . . . . .	360
c)	Schaltung nach Abb. 4.95 . . . . .	364
d)	Zusammenfassung . . . . .	364
Anhang 4C.	Graphische Analyse, Betriebskennlinien und Löschkreisstrukturen . . . . .	365
4C.1	Allgemeines . . . . .	365
4C.2	$u$ - $Z$ -Diagramm für den Löschkondensator eines Gleichstromstellers . . . . .	365
4C.3	Aufladevorgang bei selbstgeführten Wechselrichtern . . . . .	366
4C.4	McMurray-Inverter . . . . .	366
4C.5	Betriebskennlinien . . . . .	369
4C.6	Strukturen der Löschsaltungen . . . . .	371
Anhang 4D.	Bemerkungen zu den Tafeln 4.1 und 4.2 . . . . .	375
4D.1	Tafel 4.1 (Systeme der Leistungselektronik) . . . . .	375
4D.2	Tafel 4.2 (Strukturen selbstgeführter Schaltungen) . . . . .	378
Anhang 4E.	Dimensionierungshinweise . . . . .	378
4E.1	Netzgeführte Schaltungen . . . . .	378
4E.2	Selbstgeführte Schaltungen . . . . .	378
4E.2.1	Gleichstromsteller . . . . .	378
a)	Bestimmung der Größe des Löschkondensators und Allgemeines zur Thyristorauswahl . . . . .	378
b)	Dimensionierung des Löschkondensators hinsichtlich Spannungsfestigkeit . . . . .	379
c)	Einfluß von nicht geglättetem Laststrom . . . . .	380
d)	Dimensionierung von $L_u$ . . . . .	381
4E.2.2	Selbstgeführte Wechselrichter . . . . .	382
4E.2.2.1	Allgemeines . . . . .	382
4E.2.2.2	Dimensionierung von Kondensatoren und Induktivitäten . . . . .	382
4E.2.2.2.1	Spannungswechselrichter . . . . .	382
a)	Allgemeines . . . . .	382
b)	Dimensionierung von Schwingkreisen am Beispiel der Schaltung nach Abb. 4C.2 . . . . .	382
c)	Dimensionierung bei Einzellöschung . . . . .	385
d)	Dimensionierung bei Phasenfolgelöschung . . . . .	388
4E.2.2.2.2	Stromwechselrichter . . . . .	389
4E.2.2.3	Dimensionierung von Thyristoren und Dioden . . . . .	390
4E.2.2.4	Dimensionierung der Zwischenkreise . . . . .	393
4E.3	Auslegung der Steuerungskreise . . . . .	394
<b>5.</b>	<b>Steuerung und Betrieb leistungselektronischer Schaltungen (Steuerungskreise, Schaltungen für Antriebe und Regelungen) . . . . .</b>	<b>395</b>
5.1	Allgemeines . . . . .	395

5.2	Steuerungskreise für Phasenanschnitt sowie für Wechsel- und Drehstromsteller . . . . .	396
5.2.1	Steuerungen bei Lasten mit vernachlässigbarer Induktivität und allgemeine Prinzipien . . . . .	396
5.2.2	Steuerungen bei Verbrauchern mit induktivem Anteil . . . . .	402
5.3	Steuerungskreise für Nullspannungssteuerung (Impulspaketsteuerung) . . . . .	404
5.3.1	Allgemeines . . . . .	404
5.3.2	Lasten mit vernachlässigbarer Induktivität . . . . .	405
5.3.2.1	Nullspannungsschalter in diskreter Ausführung . . . . .	405
5.3.2.2	Integrierte Nullspannungsschalter . . . . .	406
5.3.3	Induktive Last – Nullstromsteuerung . . . . .	407
5.4	Steuerungen bei Antrieben mit netzgeführten Stromrichtern . . . . .	409
5.4.1	Einführung, Drehmoment–Drehzahl-Diagramm . . . . .	409
5.4.2	Einquadrantenbetrieb . . . . .	411
	a) Einphasige halbgesteuerte Brückenschaltung . . . . .	411
	b) Dreiphasige halbgesteuerte Brückenschaltung . . . . .	412
5.4.3	Zweiquadrantenbetrieb . . . . .	412
5.4.4	Umkehrbetrieb (Vierquadrantenbetrieb) . . . . .	413
	a) Allgemeines: Eingriffe im Ankerkreis und im Feldkreis . . . . .	413
	b) Ankerkreisumschaltung . . . . .	414
	c) Kreisstromfreie Ankerstromumkehr . . . . .	415
	d) Kreisstrombehaftete Ankerstromumkehr . . . . .	417
	d1) Umkehrstromrichter mit Mittelpunktschaltungen . . . . .	417
	d2) Umkehrstromrichter mit Brückenschaltungen . . . . .	422
	e) Feldumkehr durch gesteuerte Stromrichter . . . . .	426
	f) Feldkreisumschaltung . . . . .	427
5.4.5	Zusammenfassung der Steuerungsgesetze . . . . .	427
5.4.5.1	Vollgesteuerte Schaltungen ohne Freilaufdiode . . . . .	427
5.4.5.2	Vollgesteuerte Schaltungen mit Freilaufdiode . . . . .	428
5.4.5.3	Halbgesteuerte Schaltungen . . . . .	429
	a) Gute Glättung . . . . .	429
	b) Ohmsche Last . . . . .	429
5.4.5.4	Zusammenfassung der Steuerkennlinien und Compoundierung . . . . .	429
5.5	Steuerungsmethoden für Gleichstromsteller . . . . .	430
a)	Impulsbreitensteuerung . . . . .	431
b)	Impulsfolgesteuerung . . . . .	431
c)	Zweipunktregelung . . . . .	432
5.6	Steuerungsmethoden für selbstgeführte Wechselrichter im allgemeinen . . . . .	436
5.6.1	Steuerung der Eingangsgleichspannung . . . . .	436
5.6.2	Zündeinsatzsteuerung (Zündwinkelsteuerung, Impulsbreitensteuerung mit einem Ansteuerimpuls pro Halbschwingung) . . . . .	436
5.6.3	Impulsbreitensteuerung (mit mehr als einem Ansteuerimpuls pro Halbschwingung; einfache Form des Pulswechselrichters) . . . . .	439
5.6.4	Erzeugung sinusähnlicher Spannungen (Pulswechselrichter) . . . . .	439
5.6.5	Erhöhung der Pulszahl . . . . .	448
5.6.6	Generelles zum dreiphasigen Betrieb . . . . .	449
5.7	Spezielle Gesichtspunkte zu den Steuerungsmethoden für Umrichter mit Zwischenkreis . . . . .	449
5.7.1	Allgemeine Steuerung . . . . .	449
5.7.2	„Stromrichtermotor“ . . . . .	452
5.8	Direktumrichter und ihre Steuerungen . . . . .	454
a)	Trapezumrichter . . . . .	454
b)	Steuerumrichter . . . . .	457

5.9	Transvektorregelung	461
5.10	Weitere Steuerungsarten	462
5.11	Literatur	463
<b>6.</b>	<b>Netz- und Lastverhalten leistungselektronischer Schaltungen</b>	<b>465</b>
6.1	Prinzipielles zu den Netzurückwirkungen	465
6.1.1	Allgemeines	465
6.1.2	Vorschriften	468
6.1.2.1	Internationale Vorschriften und elektrische Netze	468
a)	Allgemeines	468
b)	Netzimpedanzen	469
c)	Genormte Netzimpedanz	471
d)	Kurzschlußleistung	472
e)	Zulässige Größe von Spannungsüberschwingungen bei Anschmittsteuerung	472
f)	Flicker	472
g)	Statistische Überlegungen	473
6.1.2.2	Nationale Vorschriften	473
a)	Symmetrische Phasenanschnittsteuerung	474
b)	Unsymmetrische Phasenanschnittsteuerung	474
c)	Grenzen der Taktleistung bei Schwingungspaketsteuerung	474
6.1.2.3	Ergänzende Bemerkungen	475
6.2	Leistungsfaktor und Oberschwingungen	475
6.2.1	Gesteuerte Gleich- und Wechselrichter mit Netzführung	475
6.2.1.1	Leistungsfaktor $\cos \varphi_1$	475
6.2.1.2	Oberschwingungen des Netzstromes und der Lastspannung	477
6.2.1.2.1	Überlappung $u = 0$	477
a)	Vollgesteuerte Schaltungen ohne Freilaufdiode	477
b)	Halbgesteuerte Schaltungen bzw. Verwendung einer Freilaufdiode	483
6.2.1.2.2	Überlappung $u > 0$	487
6.2.1.2.3	Kommutierungseinbrüche	488
6.2.2	Nullspannungssteuerung (Impulspaket- oder Schwingungspaketsteuerung)	491
6.2.3	Wechselstrom- und Drehstromsteller	492
6.2.4	Direktumrichter	493
6.3	Maßnahmen zur Verbesserung des Leistungsfaktors und des Oberschwingungsgehaltes	493
6.3.1	Allgemeines	493
6.3.2	Maßnahmen durch geeignete Wahl bzw. Auslegung der leistungselektronischen Schaltung	494
6.3.2.1	Verbesserung des Leistungsfaktors	494
6.3.2.1.1	Freilaufdioden	494
6.3.2.1.2	Folgesteuerung	496
6.3.2.1.3	Vollständige Elimination der Phasenverschiebung und Erzeugung kapazitiven Verhaltens	500
6.3.2.1.4	Weitere Methoden zur Reduktion der Phasenverschiebung im Netz	501
6.3.2.1.5	Vergleich der angegebenen Methoden bezüglich Blindleistung	501
6.3.2.2	Reduktion der Netzstromharmonischen	502
6.3.2.2.1	Erhöhung der Pulszahl	502
6.3.2.2.2	Steuerungstechnische Maßnahmen zur Reduktion der Netzstromüberschwingungen	503
6.3.2.3	Gleichzeitige Optimierung von Leistungsfaktor und Oberschwingungsgehalt	505

6.3.3	Kompensationsmethoden (Störungsminderung durch Zusatzeinrichtungen außerhalb der leistungselektronischen Schaltung) . . . . .	505
6.3.3.1	Allgemeines . . . . .	505
6.3.3.2	Verbesserung des Leistungsfaktors . . . . .	506
6.3.3.3	Verbesserung des Oberschwingungsverhaltens . . . . .	507
6.3.3.3.1	Filter (Saugkreise) . . . . .	507
6.3.3.3.2	Statistische Kompensation von Oberschwingungen . . . . .	510
6.4	Pulszeitsteuerung zur Oberschwingungsgehalts- und Leistungsfaktoroptimierung . . . . .	512
6.4.1	Allgemeine Prinzipien . . . . .	512
6.4.2	Steuerungsgesetze für ohmsche Last . . . . .	515
6.4.3	Steuerungsgesetze für induktive Last . . . . .	517
6.5	Filter (Saugkreise, Siebkreise) . . . . .	519
6.5.1	Allgemeines . . . . .	519
6.5.2	Filter bei netzgeführten Schaltungen . . . . .	520
6.5.2.1	Glättung von Lastspannungen . . . . .	520
a)	Glättungsinduktivität . . . . .	520
b)	Allgemeine Filter . . . . .	523
6.5.2.2	Glättung des Netzstromes . . . . .	525
6.5.3	Filter für selbstgeführte Schaltungen . . . . .	525
6.5.3.1	Aufbau und Übertragungsfunktion . . . . .	525
6.5.3.2	Dimensionierung von $L$ und $C$ . . . . .	528
6.5.3.3	Das Ott-Filter . . . . .	530
6.5.3.4	Weitere Methoden zur Verbesserung der Ausgangsspannung . . . . .	531
6.6	Transformatoren für Stromrichter . . . . .	531
6.6.1	Allgemeines . . . . .	531
6.6.2	Einpuls-Mittelpunktschaltung (M1) . . . . .	536
6.6.3	Zweipuls-Mittelpunktschaltung (M2) . . . . .	538
6.6.4	Zweipuls-Brückenschaltung (B2) . . . . .	540
a)	Große Glättungsdrossel (induktive Last), vollgesteuert . . . . .	540
b)	Ohmsche Last, vollgesteuert . . . . .	540
c)	Halbgesteuerte Brückenschaltungen (B2H) . . . . .	541
6.6.5	Dreipuls-Mittelpunktschaltung (M3) . . . . .	541
6.6.6	Sechspulsschaltungen . . . . .	545
6.6.6.1	Dreiphasige Reihenschaltung . . . . .	545
6.6.6.2	Sechspuls-Brückenschaltung (Dreiphasen-Brückenschaltung B6) . . . . .	546
6.6.6.3	Sechspuls-Mittelpunktschaltung (M6) . . . . .	549
6.6.6.4	Saugdrosselschaltung (Doppel-Dreipuls-Mittelpunktschaltung, parallel, M3.2) . . . . .	551
6.6.6.4.1	Berechnung der Transformatortypenleistung . . . . .	551
6.6.6.4.2	Berechnung der Saugdrosseltypenleistung . . . . .	553
6.6.6.4.3	Sperrspannung . . . . .	554
6.6.6.5	Vergleichendes Beispiel: Dimensionierung mit Brücken- und Saugdrosselschaltung . . . . .	554
a)	Saugdrosselschaltung . . . . .	555
b)	Sechspuls-Brückenschaltung mit $Yy0$ . . . . .	555
6.6.7	Ergänzende Bemerkungen . . . . .	556
6.6.7.1	Berücksichtigung der Überlappung . . . . .	556
6.6.7.2	Berücksichtigung der Magnetisierungskennlinien . . . . .	556
6.6.8	Bemerkungen zu Tafel 6.1 (Spannungen und Ströme wichtiger netzgeführter Schaltungen mit Zahlenbeispielen) . . . . .	557
6.7	Literatur . . . . .	559

<b>7. Funkstörungen (elektromagnetische Beeinflussungen, EMB) und elektromagnetische Verträglichkeit (EMV)</b>	<b>562</b>
7.1 Einführung	562
7.2 Überblick über die Entstehung und Reduzierung elektromagnetischer Beeinflussungen	565
7.3 Vorschriften, Normen und Meßmethoden	568
7.3.1 Allgemeines	568
7.3.2 Störspannung im Bereich von 0 bis 20 kHz und Gefährdungsspannung	569
7.3.2.1 Praktisches Beispiel	569
7.3.2.2 Geräuschspannung (Stör- und Fremdspannung)	570
7.3.2.3 Längsspannung (Gefährdungsspannung)	570
7.3.3 Störungen im Bereich von 150 kHz bis 30 MHz	571
7.3.4 Störungen im Bereich ab 30 MHz	573
7.3.5 Zusammenfassung	575
7.4 Berechnungen von Beeinflussungsspannungen	575
7.5 Entstörungsmaßnahmen	576
7.6 Literatur	579
<b>8. Anwendungen und spezielle Probleme der Leistungselektronik (Ergänzungen und Überblick)</b>	<b>582</b>
8.1 Allgemeines	582
8.2 Hochspannungsgleichstromübertragung (HGÜ)	583
8.3 Unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV)	585
8.4 Leistungselektronik in Flugzeugen und in der Raumfahrt	586
8.5 Erzeugung hoher Gleichspannung für geringe Leistungen	587
8.6 Netzgeräte	590
8.7 Stromversorgung in der Elektrochemie	590
8.8 Weitere Stromversorgungsanlagen	590
8.9 Thyristor-Wechselspannungsregler	591
8.10 Ladegleichrichter	592
8.11 Widerstandsschweißen	592
8.12 Anwendungen von Wechsel- und Drehstromstellern	593
8.13 Thyristoren bei Induktionsheizungs- und Induktionsschmelzanlagen	593
8.14 Verschiedene Anwendungen für kleine Leistungen	593
8.15 Thyristorerregung von Synchronmaschinen	593
8.16 Leistungselektronische Schaltungen zur Verbesserung des Leistungsfaktors in Netzen	593
8.17 Oberschwingungen (Netzurückwirkungen und Funkstörungen)	594
8.18 Stromrichterantriebe einschließlich Anwendungen in Fahrzeugen	594
a) Gleichstromantriebe	594
b) Wechselstromantriebe	594
8.18.1 Gleichstromantriebe	596
8.18.1.1 Anwendung von netzgeführten Stromrichtern	596
8.18.1.2 Anwendung von Gleichstromstellern	598
8.18.2 Wechselstromantriebe	599
8.18.2.1 Systeme mit nicht steuerbarer Frequenz	600
a) Drehstromsteller	600
b) Untersynchrone Stromrichter-kaskade	600
c) Gepulster Läuferwiderstand	601
8.18.2.2 Systeme mit steuerbarer Frequenz	601
a) Direktumrichter	601
b) Selbstgeführte Umrichter	602
8.18.3 Vergleich Drehstromantrieb – Gleichstromantrieb	603
8.19 Allgemeines über Dimensionierungen von Systemen der Leistungselektronik	604

8.20 Thyristorsteuerung mit Mikroprozessoren . . . . .	604
8.21 Aktuelle Entwicklungstendenzen der Leistungselektronik . . . . .	608
8.22 Literatur . . . . .	608
Anhang 8A. Neuere Methoden für Spannungssteuerungen und Stromregelungen . . . . .	614
<b>9. Zeitschriften, Normen und Vorschriften, Konferenzen und Sammelwerke . . . . .</b>	<b>618</b>
9.1 Einleitung . . . . .	618
9.2 Deutsch- und englischsprachige Fachzeitschriften, in denen regelmäßig (zumindest des öfteren) leistungselektronische Probleme behandelt werden bzw. wurden . . . . .	618
9.3 Konferenzen . . . . .	620
9.4 Sammelwerke . . . . .	623
9.5 Normen . . . . .	624
9.5.1 Grundlegende Normen . . . . .	625
9.5.2 Bauelemente . . . . .	626
9.5.3 Schaltungstechnik . . . . .	626
9.5.4 Netzurückwirkungen . . . . .	627
9.5.5 EMV . . . . .	627
9.5.6 Zusammenfassende und erläuternde Publikationen zu den deutschen (bzw. auch zu internationalen) Vorschriften zur EMV . . . . .	627
<b>10. Neuere aktive Bauelemente, Ansteuerungen und Beschaltungen . . . . .</b>	<b>629</b>
10.1 Einführung . . . . .	629
10.1.1 Grundsätzliches . . . . .	629
10.1.2 Moderne Leistungshalbleiter (Überblick) . . . . .	629
10.1.3 Allgemeine Betrachtung von Leitmechanismen in Halbleitern . . . . .	632
a) Zufuhr von Energie . . . . .	632
b) Majoritätsladungsträger . . . . .	632
c) Minoritätsladungsträger . . . . .	633
10.2 Dioden in der Leistungselektronik . . . . .	635
10.2.1 Einleitung . . . . .	635
10.2.2 Ein- und Ausschaltverhalten schneller Leistungsdioden . . . . .	636
10.2.3 <i>pin</i> - und <i>psn</i> -Dioden . . . . .	637
a) Thermischer Durchbruch . . . . .	638
b) Lawinendurchbruch (= Avalancheeffekt) . . . . .	638
c) Zenereffekt . . . . .	639
10.2.4 Schottkydioden . . . . .	639
10.3 Bipolare Leistungstransistoren und Entlastungsnetzwerke . . . . .	640
10.3.1 Einführung . . . . .	640
10.3.2 Aufbau . . . . .	641
10.3.3 Schaltverhalten . . . . .	641
10.3.4 Antisättigungsnetzwerke . . . . .	643
10.3.5 Parallelbetrieb . . . . .	644
10.3.6 Entlastungsnetzwerke . . . . .	645
10.3.6.1 Ausschaltentlastung . . . . .	645
10.3.6.2 Einschaltentlastung . . . . .	651
10.3.7 Verlustleistungsoptimierung . . . . .	653
10.3.8 Darlingtonstufe . . . . .	657
10.4 Gate Turn-Off Thyristoren (GTOs) . . . . .	658
10.4.1 Einführung . . . . .	658
10.4.2 Aufbau . . . . .	658
10.4.3 Funktionsweise . . . . .	661
10.4.3.1 Einschaltvorgang . . . . .	661

10.4.3.2	Ausschaltvorgang	662
10.4.3.3	Dynamischer Avalanche	664
10.4.4	Steuergenerator	665
10.4.5	Reihen- und Parallelschaltung von GTOs	667
10.5	Power-MOSFET	668
10.5.1	Aufbau und Wirkungsweise	669
10.5.2	Statisches Verhalten	676
10.5.3	Dynamisches Verhalten	678
10.5.4	Betriebsgrenzen	682
10.5.4.1	Gatespannung	682
10.5.4.2	Drainspannung	682
10.5.4.3	Drainspannungsanstieg	682
10.5.4.4	Drainstrom	683
10.5.4.5	Thermische Grenzen	683
10.5.4.6	Safe Operating Area (SOA)	683
10.5.5	Verluste	684
10.5.5.1	Statische Verluste	684
10.5.5.2	Dynamische Verluste	684
10.5.6	Beschaltungen des MOSFETs	684
10.5.6.1	Gatebeschaltung	684
10.5.6.2	Schutzbeschaltungen	685
10.5.7	Parallelbetrieb	686
10.5.8	Typische Ansteuerschaltungen	686
10.5.8.1	Elektrisch isolierte Ansteuerungen	686
10.5.8.2	Ansteuerung mit logischen Gattern	687
10.5.9	Synchrongleichrichter	688
10.6	IGBT	690
10.6.1	Allgemeines	690
10.6.2	Prinzipieller Aufbau	691
10.6.3	Technische Ausführungsformen	695
10.6.3.1	Punch-Through-IGBT	695
10.6.3.2	Non-Punch-Through-IGBT	697
10.6.3.3	Vergleich Punch-Through-IGBT – Non-Punch-Through-IGBT	699
10.6.3.4	FS-IGBT (Field-Stop-IGBT)	700
10.6.3.5	Trench-IGBT	701
10.6.4	Funktionsweise (Physikalische Grundlagen)	703
10.6.4.1	Einschaltvorgang	704
A.	Betrachtung über die Ladungsträgerpaare	705
B.	Einfachere Betrachtungsweise über die einzelnen Ladungsträgerarten	706
10.6.4.2	Ausschaltvorgang	706
10.6.5	Ersatzschaltbild	707
10.6.6	Schaltkreissymbole	707
10.6.7	Statisches Strom–Spannungs–Verhalten	709
10.6.7.1	Grundsätzliches	709
10.6.7.2	Durchlaßeigenschaften	711
10.6.8	Dynamisches Strom–Spannungs–Verhalten	713
10.6.8.1	Einschalten	714
10.6.8.2	Ausschalten	715
10.6.8.3	Schweifstrom	716
10.6.8.4	Millereffekt	717
10.6.9	Ein- und Ausschaltverluste (hartes Schalten)	718
10.6.9.1	Näherungsweise Berechnung	718

10.6.9.2	Kompromiß zwischen Durchlaßspannung und Ausschaltzeit . . . . .	720
10.6.9.3	Beeinflussung der Ausschaltverluste durch eine negative Gate-Emitter-Spannung . . . . .	721
10.6.9.4	Anforderungen an Ansteuerschaltungen . . . . .	722
a)	Potentialtrennung zur Regelelektronik . . . . .	724
b)	Schutz der Signalwege bei hohen Potentialänderungsgeschwindigkeiten . . . . .	724
c)	Schutz gegen Querkurzschlüsse bei Halbbrückenzweigen . . . . .	724
d)	Schutz gegen Fehlschaltungen bei noch nicht vollständig aufgebauten Versorgungsspannungen . . . . .	725
e)	Schutz gegen Überstrom, Kurzschluß und Überspannung . . . . .	725
10.6.9.5	Schaltentlastungsnetzwerke für IGBTs . . . . .	725
10.6.10	Schutz des IGBTs . . . . .	737
10.6.10.1	Überspannung . . . . .	738
10.6.10.2	Überstrom . . . . .	738
10.6.11	Betriebsgrenzen . . . . .	740
10.6.11.1	SOA (Safe Operating Area) . . . . .	740
10.6.11.1.1	FBSOA (Forward Biased Safe Operating Area) . . . . .	742
10.6.11.1.2	RBSOA (Reverse Biased Safe Operating Area) . . . . .	743
10.6.11.2	Latch-Up (Einrasten) . . . . .	744
10.6.11.2.1	Statisches Latch-Up . . . . .	744
10.6.11.2.2	Dynamisches Latch-Up . . . . .	745
10.6.11.2.3	Verhinderung des Latch-Up . . . . .	745
10.6.12	Parallelschaltbarkeit . . . . .	745
10.6.12.1	Einflüsse unterschiedlicher Parameter, Bauteilselektion . . . . .	746
10.6.12.2	Beschaltungsmaßnahmen . . . . .	747
10.6.12.3	Layoutmaßnahmen . . . . .	748
10.6.12.4	Einfluß unterschiedlicher Sperrschichttemperaturen . . . . .	749
10.6.12.5	Herabsetzen der Nennbelastung (Derating) . . . . .	750
10.6.13	Serienschaltbarkeit . . . . .	750
10.6.13.1	Einflüsse unterschiedlicher Parameter . . . . .	750
10.6.13.2	Beschaltungsmaßnahmen . . . . .	751
10.6.13.2.1	Aktive Methoden der Spannungssymmetrierung . . . . .	751
10.6.13.2.2	Master-Slave-Prinzip . . . . .	753
10.6.13.2.3	Schaltzeitenkorrektur . . . . .	753
10.6.13.2.4	Schlußfolgerungen . . . . .	754
10.7	IGCT und Vergleich mit dem IGBT . . . . .	754
10.7.1	IGCT . . . . .	754
10.7.1.1	Einleitung . . . . .	754
10.7.1.2	Aufbau des Wafers . . . . .	755
10.7.1.2.1	Transparenter Emitter . . . . .	757
10.7.1.2.2	Pufferzone . . . . .	758
10.7.1.3	Funktionsweise . . . . .	760
10.7.1.3.1	Einschaltvorgang . . . . .	760
10.7.1.3.2	Ausschaltvorgang . . . . .	763
10.7.1.4	Aufbau des Gehäuses mit Gatesteuerleitung . . . . .	765
10.7.1.5	Vorgeschlagenes Symbol für die Schalt- und Stromlaufpläne . . . . .	767
10.7.2	Vergleich zwischen IGCT (GTO) und IGBT . . . . .	768
10.7.2.1	Vergleich von 3,3kV-Leistungshalbleiterschaltern . . . . .	768
10.7.2.2	Ausfallwahrscheinlichkeit . . . . .	769
10.7.2.3	Kosten . . . . .	771
10.7.2.4	Zusammenfassung: Vorteile – Nachteile . . . . .	772
10.7.3	Ausblick . . . . .	772

10.8	MOS-Controlled Thyristor (MCT)	773
10.8.1	Funktionsweise des MCTs	773
10.8.2	Realisierung des MCTs	774
10.8.3	Zulässige Gatespannungs-Kurvenformen	775
10.8.3.1	Spezifikation der Gatespannungs-Kurvenform	776
10.8.3.2	Negative Amplitude, MCT eingeschaltet	776
10.8.3.3	Negative Spannungsflanke	776
10.8.3.4	Positive Amplitude	777
10.8.3.5	Positive Flanke	777
10.8.3.6	Derating	777
10.8.4	MCT-Ansteuerschaltungen	777
10.8.5	Einsatzgebiete des MCTs	780
10.9	Ansteuerschaltungen für MGDs	781
10.9.1	Einführung	781
10.9.1.1	Anwendungsgebiete für Treiber	781
a)	Gatewiderstand	781
b)	Parasitäre Effekte	782
c)	Low-Side- und High-Side-Treiber	782
10.9.1.2	MOSFETs und IGBTs	782
10.9.1.3	MCTs	783
10.9.2	Ein- und Ausschaltvorgang unter Einfluß des Gatewiderstandes	783
10.9.2.1	Gatewiderstand	783
a)	Vorgaben des Herstellers	787
b)	Schaltfrequenz	787
c)	Schutzbeschaltungen	787
d)	Abstand zwischen Schaltelement und Treiber	787
e)	Schaltverluste	787
10.9.2.2	Einschaltvorgang	788
1.	Anfangsverzögerung $T_{DLY1}$	788
2.	Einschalten und zweite Verzögerung $T_{DLY2}$	788
3.	Endgültiges Einschalten	790
10.9.2.3	Ausschaltvorgang	790
10.9.3	Low- und High-Side-Driving	794
10.9.3.1	Low-Side-Driving (Treiber)	794
10.9.3.2	High-Side-Driving (Treiber)	794
10.9.3.2.1	Getrennte Gateversorgung	796
10.9.3.2.2	Bootstrap-Verfahren	797
10.9.3.2.3	Ladungspumpe	799
10.9.3.2.4	Impulstransformator	803
10.9.3.2.5	Carrier Drive	805
10.9.4	Galvanische Trennung zwischen Steuer- und Leistungskreis	806
10.9.4.1	Optische Isolation	806
10.9.4.2	Transformator	807
10.9.5	Ergänzende Details	813
10.9.5.1	$du/dt$ - und $di/dt$ -induziertes Einschalten	813
10.9.5.2	Unterspannungserkennung UVLO	814
10.9.5.3	Sense-Eingang	815
10.9.5.4	Sicherheitsausschaltung	819
10.9.5.5	Parallele Treiber	819
10.9.5.6	Überspannungsschutz und Snubbernnetzwerke	820
1.	Externe Überspannungen	820
a)	Hochfrequente Überspannungen	820

b) Niederfrequente Überspannungen . . . . .	820
2. Interne Überspannungen . . . . .	821
10.9.5.7 Schaltungsentwurf mit Hilfe der Gate-Charge . . . . .	821
10.9.6 Vergleiche von industriell erzeugten Treibern . . . . .	827
10.9.6.1 Einzelchiptreiber . . . . .	828
A. Pufferverstärker . . . . .	828
B. Einzeltreiber . . . . .	828
C. Halbbrücken-, Vollbrücken- und Dreiphasentreiber . . . . .	829
D. Treiber mit eingebauten Leistungs-FETs . . . . .	829
E. Hybride Treiberbausteine . . . . .	829
F. Treiber für Spezialanwendungen . . . . .	829
10.9.6.2 Treibermodule . . . . .	830
10.10 Cool-MOS . . . . .	831
10.10.1 Allgemeines . . . . .	831
10.10.2 Aufbau . . . . .	833
10.10.3 Optimierte Schaltverhalten und reduzierte Kapazitäten . . . . .	835
10.10.4 Neuartiger Aufbau von Netzteilen . . . . .	838
10.11 Static Induction Transistor (SIT) und Thyristor (SITH) . . . . .	839
10.11.1 Static Induction Transistor (SIT) . . . . .	839
10.11.1.1 Allgemeines . . . . .	839
10.11.1.1.1 Langkanal-JFET . . . . .	839
10.11.1.1.2 Kurzkanal-JFET = SIT (Überblick) . . . . .	839
10.11.1.2 Aufbau . . . . .	841
10.11.1.3 Funktionsdetails . . . . .	841
10.11.1.4 Betriebsverhalten des SITs . . . . .	844
10.11.2 Static Induction Thyristor (SITH) . . . . .	844
10.11.2.1 Aufbau und Allgemeines . . . . .	844
10.11.2.2 Betriebsverhalten . . . . .	845
10.12 Trench-Elemente und MCD-Strukturen . . . . .	846
10.12.1 Trench-IGBT . . . . .	846
10.12.2 $pn^-n$ -Dioden . . . . .	848
10.12.3 $pn^-n$ -Dioden mit MOS-Steuerköpfen . . . . .	850
10.12.4 Trench-Diode nach dem MCD-Prinzip . . . . .	854
10.12.5 Trench-Double-Zelle (TD-IGBT) . . . . .	855
10.12.6 Trench-MOS-Thyristor-Zelle (TMCT) . . . . .	856
10.13 Smart-Power-ICs . . . . .	858
10.13.1 Isolationstechniken . . . . .	858
10.13.1.1 Dielektrische Isolation . . . . .	859
10.13.1.2 Selbstisolation (implizite Isolation) . . . . .	859
10.13.1.3 Sperrschichtenisolation . . . . .	859
10.13.2 Integrierte Leistungsbaulemente . . . . .	860
10.13.2.1 Vertikal- und Horizontalstrukturen . . . . .	860
10.13.2.2 Multipower-BCD . . . . .	861
10.13.3 Schutzschaltungen . . . . .	862
10.13.3.1 Übertemperatur . . . . .	862
10.13.3.2 Kurzschlüsse . . . . .	862
10.13.3.2.1 Kurzschluß des Ausganges gegen die Versorgung bzw. Masse . . . . .	863
10.13.3.2.2 Kurzschluß der Versorgungsspannung . . . . .	864
10.13.3.2.3 Kurzschluß der Last . . . . .	864
10.13.3.2.4 Schutzmaßnahmen gegen Überstrom . . . . .	864
10.13.3.3 Unterbrechungen . . . . .	865
10.13.3.4 Verlustleistungsbegrenzung . . . . .	866

10.13.4 Ansteuerschaltungen für Power-MOSFETs . . . . .	867
10.13.4.1 Ansteuerschaltungen für Low-Side-Schalter . . . . .	867
10.13.4.2 Ansteuerschaltungen für High-Side-Schalter . . . . .	867
10.13.4.2.1 Bootstraptechnik . . . . .	868
10.13.4.2.2 Ladungspumpe . . . . .	869
10.13.5 Selbstdiagnoseeinrichtungen . . . . .	869
10.13.5.1 Schnittstellen . . . . .	870
10.13.5.1.1 Analoge Schnittstellen . . . . .	870
10.13.5.1.2 Digitale Schnittstellen . . . . .	870
10.13.5.1.3 CAN (Controller Area Network) . . . . .	870
10.13.6 Anwendungen . . . . .	871
10.13.6.1 TOPFET . . . . .	871
10.13.6.1.1 ESD-Schutz . . . . .	871
10.13.6.1.2 Überspannungsschutz . . . . .	871
10.13.6.1.3 Übertemperaturausschaltung . . . . .	872
10.13.6.1.4 Kurzschlußschutz . . . . .	872
10.13.6.1.5 Gateansteuerung . . . . .	872
10.13.6.1.6 Schaltgeschwindigkeit . . . . .	872
10.13.6.2 TOPFET mit fünf Anschlüssen . . . . .	873
10.13.6.3 HITFET . . . . .	873
10.13.6.4 Super-Smart-Power-IC L9942 . . . . .	874
10.13.6.4.1 Leistungsteil . . . . .	874
10.13.6.4.2 Mikrocontroller . . . . .	874
10.13.6.4.3 Spannungsversorgung und Einsatzgebiet . . . . .	874
10.14 Neue Bauelemente der Leistungselektronik und zukünftige Entwicklungen . . . . .	875
10.14.1 Einleitung . . . . .	875
10.14.2 IEGT (Injection Enhanced Insulated Gate Bipolar Transistor) . . . . .	876
10.14.2.1 Allgemeines . . . . .	876
10.14.2.2 Aufbau und Wirkungsweise . . . . .	876
10.14.3 CSTBT (Carrier Stored Trench-Gate Bipolar Transistor) . . . . .	878
10.14.3.1 Allgemeines . . . . .	878
10.14.3.2 Aufbau und Wirkungsweise . . . . .	878
10.14.4 <i>n</i> -MCT mit Pufferschichte und Anodenemitter-Kurzschlüssen . . . . .	879
10.14.4.1 Allgemeines . . . . .	879
10.14.4.2 Aufbau . . . . .	880
10.14.4.2.1 Anodenstruktur . . . . .	880
10.14.4.2.2 Kathodenstruktur . . . . .	880
10.14.4.3 Charakteristische Eigenschaften . . . . .	881
10.14.5 DG-MCT (Dual-Gate MOS Controlled Thyristor) . . . . .	881
10.14.5.1 Allgemeines . . . . .	881
10.14.5.2 Aufbau und Wirkungsweise . . . . .	882
10.14.6 IGTT (IGBT Mode Turn-Off Thyristor) . . . . .	883
10.14.6.1 Allgemeines . . . . .	883
10.14.6.2 Aufbau und Wirkungsweise . . . . .	884
10.14.7 DGMOS der zweiten Generation (2 <sup>nd</sup> -Generation Dual-Gate MOS Thyristor) . . . . .	885
10.14.7.1 Allgemeines . . . . .	885
10.14.7.2 Aufbau und Wirkungsweise . . . . .	885
10.14.8 EST (Emitter-Switched Thyristor) . . . . .	886
10.14.8.1 Allgemeines . . . . .	886
10.14.8.2 Funktionsweise . . . . .	887
10.14.9 BRT (Base-Resistance-Controlled Thyristor) . . . . .	888
10.14.9.1 Allgemeines . . . . .	888

10.14.9.2 Aufbau und Wirkungsweise . . . . .	889
10.14.10 Überblick über die Feldeffekttransistoren und spezielle MOSFET-Transistoren	890
10.14.10.1 Allgemeines zu den Feldeffekttransistoren und deren Klassifikation .	890
10.14.10.2 VMOS (V-groove MOS) . . . . .	894
10.14.10.3 DMOS (Double-Diffused-MOS) . . . . .	895
10.14.10.3.1 Allgemeines zum DMOS . . . . .	895
10.14.10.3.2 Funktion und Wirkungsweise . . . . .	896
10.14.10.4 LDMOS (Lateral-Double-Diffused-MOS) . . . . .	897
10.14.10.5 UMOS (U-groove MOS) . . . . .	898
10.14.11 BiCMOS (Bipolar CMOS) . . . . .	898
10.14.12 Weitere Bauelementstrukturen und neue Entwicklungen . . . . .	902
10.14.12.1 Weitere Strukturen . . . . .	902
10.14.12.2 Neuere Entwicklungen . . . . .	903
10.14.12.2.1 Neue Materialien – Siliziumkarbid . . . . .	903
10.14.12.2.2 Neue Bauelementstrukturen . . . . .	903
10.15 Kennwerte, Abkürzungen und Definitionen . . . . .	904
10.15.1 Allgemeines . . . . .	904
10.15.2 IGBT – Kennwerte und Bezeichnungen . . . . .	906
10.15.3 GTO – Kennwerte und Bezeichnungen . . . . .	909
10.15.4 MOSFET – Kennwerte und Bezeichnungen . . . . .	911
10.16 Literatur . . . . .	914
<b>11. Strukturen der Schaltnetzteile . . . . .</b>	<b>921</b>
11.1 Überblick und Grundstrukturen ohne Potentialtrennung . . . . .	921
11.1.1 Allgemeines . . . . .	921
11.1.2 Überblick über Strukturen und Funktionen . . . . .	922
11.1.2.1 Struktur eines Schaltnetzteiles . . . . .	922
11.1.2.2 Resonanzwandler im Vergleich mit Rechteckwandlern . . . . .	925
11.1.2.3 Strukturvergleich Schaltnetzteile mit linearen Netzteilen . . . . .	928
11.1.3 Grundtopologien . . . . .	933
11.1.3.1 DC–DC-Wandler ohne galvanische Trennung (sekundärseitig getastete Schaltnetzteile) . . . . .	933
11.1.3.2 DC–DC-Wandler mit Potentialtrennung (primärseitig getastete Schaltnetzteile) . . . . .	935
11.1.4 Arbeitsweisen (diskontinuierliche und kontinuierliche Drosselströme bzw. lückender und nichtlückender Betrieb) . . . . .	938
11.1.4.1 Lückender Betrieb (= Dreieckbetrieb oder diskontinuierlicher Betrieb)	938
11.1.4.2 Nichtlückender Betrieb (= Trapezbetrieb oder kontinuierlicher Betrieb)	940
11.1.4.3 Allgemeine Prinzipien zur Schaltungsanalyse . . . . .	941
11.1.5 DC–DC-Wandler 1. Ordnung . . . . .	942
11.1.5.1 Buck-Konverter (Tiefsetzsteller) . . . . .	942
11.1.5.2 Boost-Konverter (Hochsetzsteller) . . . . .	948
11.1.5.3 Buck-Boost-Konverter (Spannungsinverter) . . . . .	957
11.1.6 Weitere Strukturen . . . . .	961
11.1.6.1 Čuk-Konverter . . . . .	961
a) Betrachtung der eingangsseitigen Induktivität $L_1$ . . . . .	963
b) Betrachtung der ausgangseitigen Induktivität $L_2$ . . . . .	964
c) Kombination der Resultate für $L_1$ und $L_2$ . . . . .	965
d) Zahlenbeispiel . . . . .	965
e) Hinweis für die Dimensionierung von $C$ . . . . .	967
11.1.6.2 Weitere Strukturen höherer Ordnung . . . . .	968
11.2 Potentialgetrennte Wandler . . . . .	968

11.2.1	Eintaktschaltungen . . . . .	969
11.2.1.1	Sperrwandler (sowie Vergleich mit dem Boost-Wandler) . . . . .	969
11.2.1.1.1	Trapezbetrieb (nichtlückend), 1. und 2. Steuerungsgesetz sowie allgemeine Definitionen der Steuerungsgesetze . . . . .	974
11.2.1.1.2	Grenzfall: Übergang vom Trapez- auf den nichtlückenden Dreieckbetrieb und Dimensionierung der Induktivitäten . . . . .	977
11.2.1.1.3	Dreieckbetrieb (lückender Betrieb) sowie 1. und 2. Steuerungsgesetz $U_2 = f_1(I_2, D)$ bzw. $U_2 = f_2(D, U_1)$ . . . . .	982
11.2.1.1.4	Grenzkurve zwischen lückendem und nichtlückendem Betrieb und Ausgangskennlinien (1. Steuerungsgesetz $U_2 = f_1(I_2, D)$ ) . . . . .	985
11.2.1.1.5	Steuerungskennlinien (3. Steuerungsgesetz $D = f_3(I_2, U_1)$ ) . . . . .	986
11.2.1.1.6	Vergleich mit dem Boostwandler und dessen Ausgangskennlinien (1. Steuerungsgesetz $U_{Norm} = f_{1, Norm}(I_{Norm}, D)$ und 2. Steuerungsgesetz $U_2 = f_2(D, U_1)$ ) . . . . .	990
11.2.1.1.7	Grenzkurve zwischen lückendem und nichtlückendem Betrieb beim Boostwandler und Vergleich mit dem Buck-Boost-Wandler . . . . .	993
11.2.1.1.8	Steuerungskennlinien (3. Steuerungsgesetz $D = f_3(I_2, U_1)$ ) und Grenzkurven beim Boost-Wandler sowie Vergleich mit den Buck- und Buck-Boost-Konvertern . . . . .	994
11.2.1.2	Eintakt-Durchflußwandler . . . . .	997
11.2.1.2.1	Trapezbetrieb (= nichtlückender Betrieb) . . . . .	1002
11.2.1.2.2	Dreieckbetrieb (= lückender Betrieb) sowie 1. und 2. Steuerungsgesetz ( $U_{Norm} = f_{1, Norm}(I_{Norm}, D)$ und $U_2 = f_2(D, U_1)$ ) . . . . .	1004
11.2.1.2.3	Grenzkurve zwischen lückendem und nichtlückendem Betrieb und Ausgangskennlinien $U_{Norm}(I_{Norm}, D)$ zum 1. Steuerungsgesetz $U_{Norm} = f_{1, Norm}(I_{Norm}, D)$ . . . . .	1008
11.2.1.2.4	Laständerung, Grenzkurve und Steuerungskennlinie $D(I_{La}, U_i)$ (3. Steuerungsgesetz $D = f_3(I_2, U_1)$ ) . . . . .	1010
11.2.1.3	Asymmetrischer Halbbrücken-Durchflußwandler . . . . .	1011
11.2.1.4	Doppel-Durchflußwandler . . . . .	1012
11.2.2	Gegentaktschaltungen . . . . .	1015
11.2.2.1	Parallelgespeister Gegentakt-Durchflußwandler . . . . .	1015
11.2.2.2	Seriengespeiste Gegentakt-Durchflußwandler . . . . .	1018
11.2.2.2.1	(Symmetrischer) Halbbrücken-Durchflußwandler . . . . .	1018
11.2.2.2.2	Vollbrücken-Durchflußwandler . . . . .	1019
11.2.2.3	Wandler mit eingepprägtem Eingangsstrom . . . . .	1020
11.3	Schaltnetzteilstrukturen höherer Ordnung . . . . .	1020
11.3.1	Allgemeines . . . . .	1020
11.3.2	Quasiresonanter Gegentaktkonverter . . . . .	1022
11.3.2.1	Schaltungsberechnung . . . . .	1022
11.3.2.2	$u$ - $Z_i$ -Diagramm für den quasiresonanten ZCS-(Lee-)Konverter . . . . .	1028
11.3.3	SEPIC(-Konverter) mit harter Schalttechnik . . . . .	1031
11.3.3.1	Einführung . . . . .	1031
11.3.3.2	Funktionsprinzip . . . . .	1032
11.3.3.3	Berechnung der Spannungs- und Stromverläufe . . . . .	1034
11.3.3.4	Mittelwerte und Steuerungsgesetz . . . . .	1035
11.3.3.5	Schaltungsvariante . . . . .	1036
11.3.4	Quasiresonanter SEPIC(-Konverter) mit ZVS-Technik . . . . .	1037
11.3.4.1	Einführung . . . . .	1037
11.3.4.2	Funktionsprinzip der ZVS-Technik . . . . .	1037
11.3.4.3	Berechnung der Spannungs- und Stromverläufe . . . . .	1038
11.3.4.4	Steuerungsgesetz . . . . .	1041

11.3.4.5	Genaue Ermittlung des Tastverhältnisses . . . . .	1043
11.3.4.6	Schaltungsvarianten . . . . .	1044
11.3.4.7	<i>u</i> - <i>Zi</i> -Diagramm für den quasiresonanten SEPIC(-Konverter) mit ZVS- Technik . . . . .	1045
11.3.5	Zeta-Konverter mit harter Schaltechnik . . . . .	1046
11.3.5.1	Einführung . . . . .	1046
11.3.5.2	Funktionsprinzip und Berechnung der Spannungs- und Stromverläufe .	1047
11.3.5.3	Mittelwerte und Steuerungsgesetz . . . . .	1049
11.3.6	Quasiresonanter Zeta-Konverter mit ZVS-Technik . . . . .	1051
11.3.6.1	Einführung . . . . .	1051
11.3.6.2	Funktionsprinzip und Berechnung der Spannungs- und Stromverläufe .	1051
11.3.6.3	Steuerungsgesetz . . . . .	1056
11.3.6.4	Schaltungsvarianten . . . . .	1057
11.3.6.5	<i>u</i> - <i>Zi</i> -Diagramm für einen quasiresonanten Zeta-Konverter . . . . .	1057
11.4	Vergleich von Konvertertopologien und Ergänzungen . . . . .	1059
11.4.1	Tabellen und Tafeln zu den Strukturen aus 11.1 bis 11.3 . . . . .	1059
11.4.2	Weitere Konvertertopologien erster Ordnung . . . . .	1065
11.4.2.1	Boost-Konverter mit Potentialtrennung . . . . .	1065
11.4.2.2	SMART-Konverter . . . . .	1065
11.4.3	Konvertertopologien höherer Ordnung (Vergleich) . . . . .	1068
11.4.3.1	Allgemeines . . . . .	1068
11.4.3.2	Ćuk-Konverter . . . . .	1069
11.4.3.3	SEPIC(-Konverter) . . . . .	1071
11.4.3.4	Zeta-Konverter . . . . .	1073
11.4.3.5	Doppelinverter . . . . .	1077
11.4.3.6	Buck/Boost-Konverter mit einem induktiven Bauelement und zwei Schaltern . . . . .	1079
11.4.3.7	Zusammenfassung . . . . .	1080
11.5	Resonante, Quasi- und Pseudoresonante Schaltungen . . . . .	1081
11.5.1	Allgemeines . . . . .	1081
11.5.2	Typische Beispiele für ZCS . . . . .	1083
11.5.2.1	Allgemeines . . . . .	1083
11.5.2.2	Anwendungsbeispiel: Quasiresonante Tiefsetzstellerstruktur . . . . .	1084
11.5.2.3	Pseudoresonante ZCS-Anwendung . . . . .	1088
11.5.3	Typische Beispiele für ZVS . . . . .	1093
11.5.3.1	Allgemeines . . . . .	1093
11.5.3.2	Hochsetzsteller mit praktisch verlustloser Ein- und verlustarmer Aus- schaltung des Hauptschalters (pseudoresonantes ZVS) . . . . .	1094
11.5.3.3	Hochsetzsteller mit pseudoresonantem ZVS (praktisch verlustlosem Einschalten) und verlustarmer Ausschaltung von Haupt- und Hilfs- schalter . . . . .	1098
11.5.4	Allgemeines zu Pseudoresonanz (Soft Switching) und Active Clamping . . . . .	1103
11.5.5	Soft Switching (Pseudoresonanz) für Wandler mit galvanischer Trennung . . . . .	1106
11.5.5.1	Funktionsweise . . . . .	1109
11.5.5.2	Spannungsbelastung der FETs . . . . .	1113
11.5.5.3	Dynamisches Verhalten . . . . .	1118
11.5.5.4	Stationärer Betrieb . . . . .	1120
11.5.5.5	Beispiele für zeitliche Verläufe . . . . .	1122
11.5.5.6	Vorteile von Soft Switching (und Active Clamping) . . . . .	1127
11.5.5.7	Nachteile von Soft Switching (und Active Clamping) . . . . .	1129
11.5.6	Soft Switching (Pseudoresonanz) für Wandler ohne galvanische Trennung . . . . .	1130
11.5.6.1	Allgemeines . . . . .	1130

11.5.6.2 Funktionsweise des Soft Switchings (Pseudoresonanz) für Hochsetzsteller . . . . .	1131
11.5.6.2.1 Ablauf einer Schaltperiode . . . . .	1131
11.5.6.2.2 Strom- und Spannungsverläufe während der Netz- und Schaltperiode . . . . .	1136
11.5.6.2.3 Vorteile des Soft Switchings (der Pseudoresonanz) . . . . .	1137
11.5.6.2.4 Nachteile des Soft Switchings (der Pseudoresonanz) . . . . .	1137
11.5.6.2.5 Vereinfachte (passive) Funktionsweise für Hochsetzsteller (passives Soft Switching) . . . . .	1137
11.5.6.2.6 Ablauf einer Schaltperiode . . . . .	1138
11.5.6.2.7 Strom- und Spannungsverläufe während einer Periode . . . . .	1140
11.5.6.2.8 Vorteile des vereinfachten (passiven) Soft Switchings . . . . .	1140
11.5.6.2.9 Nachteile des vereinfachten (passiven) Soft Switchings . . . . .	1141
11.5.6.3 Funktionsweise des Soft Switchings (Pseudoresonanz) für Tiefsetzsteller	1141
11.5.6.3.1 Ablauf einer Schaltperiode . . . . .	1142
11.5.6.3.2 Strom- und Spannungsverläufe während einer Periode . . . . .	1145
11.5.6.3.3 Vorteile . . . . .	1145
11.5.6.3.4 Nachteile . . . . .	1146
11.5.7 Zusammenfassung . . . . .	1146
11.6 Aktuelle Anforderungen an die Leistungselektronik . . . . .	1148
11.6.1 Einleitung . . . . .	1148
1. Kompakt/Industrie . . . . .	1148
2. Standard/Industrie, Consumer-Low-Cost . . . . .	1148
3. Industrial/Consumer Noise-Sensitive . . . . .	1148
4. Kleinleistungsnetzteile, Steckernetzteile . . . . .	1148
11.6.2 Aktive Bauelemente . . . . .	1149
11.6.2.1 Leistungshalbleiter (Transistoren) . . . . .	1149
a) Lateraler MOSFET . . . . .	1150
b) Vertikaler MOSFET . . . . .	1150
c) SIPMOS (Einzelzelle) . . . . .	1151
d) Cool-MOS (= Cool-FET) . . . . .	1151
e) S-FET . . . . .	1154
f) Dioden . . . . .	1157
11.6.2.2 Steuerbausteine . . . . .	1158
a) Einchiplösungen . . . . .	1158
b) Multichipmodule . . . . .	1160
11.6.2.3 ASIC-Entwicklung . . . . .	1161
11.6.2.3.1 Allgemeines . . . . .	1161
11.6.2.3.2 Beispiel eines primärseitigen ASICs . . . . .	1163
11.6.2.3.3 Beispiel eines sekundärseitigen ASICs . . . . .	1166
11.6.2.3.4 Regelungsmethoden . . . . .	1167
11.6.3 Passive Bauelemente . . . . .	1169
11.6.3.1 Übertrager . . . . .	1169
a) Allgemeines . . . . .	1169
b) Kernform . . . . .	1170
c) Spulenkörper . . . . .	1171
d) Vergußtechnik . . . . .	1171
e) Umspritztechnik . . . . .	1171
f) Wickeltechnik . . . . .	1171
g) Skin- und Proximityeffekt . . . . .	1171
h) Regelung über Regelwicklung . . . . .	1174
i) Mitregelung (= Kreuzregelung) . . . . .	1174

j) Planarwandler . . . . .	1175
k) Semi-Planarwandler . . . . .	1176
l) EMI-Filterung im Transformator . . . . .	1176
m) Schirmwicklungen . . . . .	1177
11.6.3.2 Drosseln (Speicherdrosseln) . . . . .	1179
11.6.3.3 Kondensatoren . . . . .	1181
11.6.4 Regler . . . . .	1182
11.6.5 Fertigungsaspekte . . . . .	1184
11.6.6 Spezielle Anforderungen auf Grund von Normenänderungen . . . . .	1185
11.6.7 Weitere Ausblicke und Trends . . . . .	1186
a) Multichipmodule . . . . .	1186
b) Steigerung des Wirkungsgrades . . . . .	1186
11.7 Praktische Aspekte . . . . .	1187
11.7.1 Einfluß der Wicklungskapazität auf Spannungsform und Schaltverhalten . . . . .	1187
11.7.1.1 Einfluß der Schaltungsanordnung auf die effektive Wicklungskapazität . . . . .	1187
11.7.1.2 Kuppelleffekt . . . . .	1189
11.7.2 Auswirkungen von Streuinduktivitäten in Schaltnetzteilen . . . . .	1193
11.7.2.1 Allgemeines . . . . .	1193
11.7.2.2 Schaltungsbeispiel Durchflußwandler . . . . .	1194
11.7.2.2.1 Betrieb ohne Streuinduktivität . . . . .	1195
11.7.2.2.2 Effekte der Streuinduktivität bei einfachem Ausgang . . . . .	1196
11.7.2.2.3 Auswirkungen auf die Kreuzregelung bei mehreren Ausgängen . . . . .	1198
11.7.3 Verluste bei nichtidealen Schaltnetzteilen . . . . .	1208
11.8 Literatur . . . . .	1210
<b>12. Analyse und Regelungen von Schaltnetzteilen . . . . .</b>	<b>1213</b>
12.1 Regelungskonzepte für Schaltnetzteile . . . . .	1213
12.1.1 Grundlagen . . . . .	1213
1. Wurzelortungsverfahren . . . . .	1215
2. Entwurf im Bodediagramm . . . . .	1215
3. Polvorgabe und Regelschleifennullstellen . . . . .	1216
4. Optimierung der Regelungen . . . . .	1216
12.1.2 Regelung von Schaltnetzteilen – Überblick . . . . .	1217
12.1.2.1 Allgemeines . . . . .	1217
12.1.2.2 Direkte Regelung des Tastverhältnisses $D$ (DDC) . . . . .	1218
12.1.2.3 Berücksichtigung von Eingangsspannungsänderungen (VFC) . . . . .	1220
12.1.2.4 Spitzenwert-Stromregelung (SW-CMC) und Slope-Kompensation . . . . .	1222
12.1.2.4.1 Allgemeines zur Stromregelung . . . . .	1222
1. Externe Taktfrequenz . . . . .	1222
a) Spitzen- und Mittelwert-Stromregelung . . . . .	1222
b) Minimalwert-Stromregelung . . . . .	1223
c) Pulsbreitenmodulation . . . . .	1223
2. Frei schwingende Wandler . . . . .	1223
a) Ausschaltzeit konstant . . . . .	1223
b) Einschaltzeit konstant . . . . .	1223
c) Hysterese-Stromregelung . . . . .	1223
d) Spezialfall . . . . .	1223
12.1.2.4.2 Spezielle Probleme der Spitzenwert-Stromregelung . . . . .	1229
a) Klärung der Instabilität für Tastverhältnisse größer als 0,5 für nicht-lückenden Betrieb . . . . .	1229
1. Buck-Topologie . . . . .	1232
2. Boost-Topologie . . . . .	1232

3. Buck-Boost-Topologie . . . . .	1233
b) Stabilisierung durch Slope-Kompensation . . . . .	1234
12.1.2.4.3 Subharmonische Schwingneigung . . . . .	1237
12.1.2.4.4 Strommittelwerte, Stromrippel und Topologievergleich . . . . .	1243
12.1.2.5 Mittelwert-Stromregelung (MW-CMC) . . . . .	1248
12.1.2.6 Vergleich der Stabilität von Spitzenwert- und Mittelwert-Stromregelung	1251
12.1.3 Regelungskonzepte am Beispiel des Buck-Konverters im nichtlückenden Betrieb	1252
12.1.3.1 Allgemeines . . . . .	1252
12.1.3.2 Direkte Regelung des Tastverhältnisses $D$ (DDC) . . . . .	1256
12.1.3.2.1 Der Regelkreis und seine Komponenten . . . . .	1256
a) Analyse des statischen Zustandes . . . . .	1256
b) Regler . . . . .	1258
c) PWM und Schaltelement . . . . .	1260
d) $L$ - $C$ -Ausgangskreis . . . . .	1261
12.1.3.2.2 Regelschleife und Regelkreis . . . . .	1263
a) Offene (Regel-)Schleife . . . . .	1263
b) Geschlossener Regelkreis . . . . .	1264
12.1.3.2.3 Zahlenbeispiel (Dimensionierung des Spannungsreglers) . . . . .	1265
12.1.3.3 Berücksichtigung von Eingangsspannungsänderungen (VFC) . . . . .	1274
12.1.3.3.1 Der Regelkreis und seine Komponenten . . . . .	1274
a) Analyse des statischen Zustandes . . . . .	1274
b) Regler . . . . .	1275
c) PWM und Schaltelement . . . . .	1275
d) Ausgangsfilter mit Last $R_{La}$ . . . . .	1276
12.1.3.3.2 Regelschleife und Regelkreis . . . . .	1276
a) Offene Schleife . . . . .	1276
b) Geschlossener Regelkreis . . . . .	1276
12.1.3.3.3 Zahlenbeispiel (Dimensionierung des Spannungsreglers) . . . . .	1277
12.1.3.4 Spitzenwert-Stromregelung (SW-CMC) . . . . .	1281
12.1.3.4.1 Der Regelkreis und seine Komponenten . . . . .	1281
a) Analyse des statischen Zustandes (mit $I_2 = I_L$ ) . . . . .	1281
b) Regler . . . . .	1283
c) Stromregelschleife . . . . .	1285
d) $R$ - $C$ -Ausgangsfilter . . . . .	1286
12.1.3.4.2 Regelschleife und Regelkreis . . . . .	1287
a) Offene äußere Schleife . . . . .	1287
b) Geschlossener äußerer Regelkreis . . . . .	1288
12.1.3.4.3 Zahlenbeispiel (Dimensionierung des Spannungsreglers) . . . . .	1288
12.1.3.5 Mittelwert-Stromregelung (MW-CMC) . . . . .	1294
12.1.3.5.1 Der innere (Strom-)Regelkreis und seine Komponenten . . . . .	1294
a) Analyse des statischen Zustandes . . . . .	1294
b) Stromregler (PI-Regler) . . . . .	1296
c) PWM und Schaltelement . . . . .	1296
d) Übertragungsfunktion $F_1(s)$ zwischen Spannung $U_e$ und Strom $I_L$ . . . . .	1296
12.1.3.5.2 Innere Regelschleife und Stromregelkreis . . . . .	1297
a) Offene Schleife . . . . .	1297
b) Geschlossener innerer Regelkreis . . . . .	1302
12.1.3.5.3 Zahlenbeispiel . . . . .	1304
12.1.3.5.4 Äußerer (Spannungs-)Regelkreis und seine Komponenten . . . . .	1310
a) Spannungsregler (PI-Regler) . . . . .	1311
b) Führungsübertragungsfunktion des inneren Stromregelkreises . . . . .	1311
c) Ausgangskreis . . . . .	1312

12.1.3.5.5	Äußere Regelschleife und Spannungsregelkreis mit unterlager-	1313
a)	Offene Schleife	1313
b)	Äußerer (Spannungs-)Regelkreis	1313
12.1.3.5.6	Zahlenbeispiel [Dimensionierung des (äußeren) Spannungsreglers]	1316
12.1.4	Übertragungsfunktionen – Überblick	1320
12.1.4.1	Direkte Tastverhältnisregelung	1321
12.1.4.1.1	Nichtlückender (= kontinuierlicher) Strom	1321
12.1.4.1.2	Lückender (= diskontinuierlicher) Strom	1321
12.1.4.2	Berücksichtigung von Eingangsspannungsänderungen	1321
12.1.4.2.1	Nichtlückender Strom	1321
12.1.4.2.2	Lückender Strom	1322
12.1.4.3	Stromregelung	1322
12.1.4.3.1	Spitzenwert-Stromregelung	1322
a)	Nichtlückender Betrieb	1322
b)	Lückender Betrieb	1323
12.1.4.3.2	Mittelwert-Stromregelung	1324
a)	Nichtlückender Betrieb	1324
b)	Lückender Betrieb	1326
12.1.4.4	Regler-ICs (SNT-ICs)	1327
12.1.5	Anhang	1327
12.1.5.1	MATLAB	1327
12.1.5.2	ANA	1329
12.2	Übertragungsfunktionen für Schaltnetzteile	1329
12.2.1	Allgemeines	1329
12.2.2	Übertragungsfunktionen des Buck-Konverters	1330
12.2.2.1	Kontinuierlicher Betrieb	1330
12.2.2.2	Diskontinuierlicher Betrieb	1334
12.2.2.2.1	Gleichgrößen (Gleichungen des statischen Zustandes)	1334
12.2.2.2.2	Wechselgrößen (Gleichungen für stationäre Vorgänge)	1338
12.2.3	Ersatzschaltbild und stationäre Übertragungsfunktion des SEPIC(-Konverters)	1346
12.2.4	Übertragungsfunktionen der sechs Grundtypen	1351
12.2.5	Anmerkungen zu Tafel 12.1	1355
12.2.5.1	Allgemeines	1355
12.2.5.2	Prinzipielles zur Formulierung von Steuerungsgesetzen	1359
12.2.5.3	Ergänzende Erläuterungen zu den Regelungsmethoden	1359
12.2.5.3.1	Direct Duty Cycle Control (DDC)	1359
12.2.5.3.2	Voltage Feedforward Control (VFC)	1359
12.2.5.3.3	Current Mode Control (CMC, Stromregelung)	1360
a)	Allgemeines	1360
b)	Lückender Betrieb	1361
c)	Nichtlückender Betrieb	1361
12.2.5.3.4	Stromregelung im lückenden Betrieb am Beispiel des Buck-Boost-Konverters (mit Vergleich zu Buck- und Boost-Konverter)	1361
a)	Regelung auf den Stromspitzenwert	1361
b)	Regelung auf den Strommittelwert	1369
12.2.5.3.5	Mittelwert-Stromregelung im nichtlückenden Betrieb für den Buck-Boost-Konverter	1369
12.2.6	Zusammenfassung	1372
12.3	Boost-Konverter – Übertragungsfunktionen (Literaturvergleich) und Regelungen	1373
12.3.1	Nichtlückender Betrieb	1373

12.3.1.1	Statisches und stationäres Verhalten . . . . .	1373
12.3.1.2	Kleinsignalübertragungsfunktionen (stationäres Verhalten) . . . . .	1377
12.3.1.3	Schaltungssimulation . . . . .	1383
12.3.1.4	Vergleich der Kleinsignalübertragungsfunktionen mit der Literatur . . . . .	1385
a)	Vergleich mit Lee . . . . .	1387
b)	Vergleich mit Unitorde . . . . .	1388
c)	Vergleich mit Kislovski, Redl und Sokal . . . . .	1391
12.3.1.5	Linearisierung der statischen Steuerkennlinie . . . . .	1395
12.3.1.6	Mathematische Analyse der Übertragungsfunktion $G_{U_2D}(s)$ . . . . .	1399
12.3.1.7	Regelung des Boost-Konverters . . . . .	1402
12.3.1.7.1	Direkte Regelung des Tastverhältnisses . . . . .	1404
12.3.1.7.2	Mittelwert-Stromregelung für nichtlückenden Betrieb . . . . .	1414
12.3.1.7.3	Eingangsstromregelung (beim Boost-Konverter, Anwendung für PFC) . . . . .	1419
12.3.2	Lückender Betrieb . . . . .	1421
12.3.2.1	Kleinsignalübertragungsfunktionen . . . . .	1421
A.	Variante 1 (mit Verwendung der Gleichungen des stationären Verhaltens) . . . . .	1421
a)	Kleinsignalübertragungsfunktion $G_{U_2U_1}(s)$ . . . . .	1423
b)	Kleinsignalübertragungsfunktion $G_{U_2D}(s)$ . . . . .	1425
B.	Variante 2 (basierend auf der Differentialgleichung für die Kleinsignalstörungen) . . . . .	1426
12.3.2.2	Mittelwert-Stromregelung für den diskontinuierlichen Betrieb . . . . .	1431
12.3.3	Betriebsbereiche . . . . .	1434
12.4	Buck-Boost (Flyback-)Konverter – Übertragungsfunktionen sowie (allgemeine) regelungstechnische Konzepte . . . . .	1437
12.4.1	Allgemeines . . . . .	1437
12.4.2	Regelungskonzepte und Übertragungsfunktionen (für nichtlückenden Betrieb) am Beispiel des Buck-Boost-Konverters . . . . .	1439
12.4.2.1	Übertragungsfunktionen für die direkte Regelung des Tastverhältnisses (DDC) . . . . .	1440
12.4.2.2	Berücksichtigung von Eingangsspannungsänderungen (VFC) . . . . .	1443
12.4.2.3	Übertragungsfunktionen für die Stromregelung . . . . .	1443
12.4.2.3.1	Übertragungsfunktionen für die Regelung des Ausgangsstromes . . . . .	1444
12.4.2.3.2	Übertragungsfunktionen für die Regelung des Eingangstromes (beim Buck-Boost-Konverter, Anwendung für PFC) . . . . .	1445
12.4.3	Regler . . . . .	1447
12.4.3.1	PT <sub>1</sub> -Regler („Typ 1“) . . . . .	1447
12.4.3.2	PD <sub>2</sub> T <sub>3</sub> -Regler („Typ 2“) . . . . .	1449
12.4.3.3	Anwendungsbereiche der beiden Reglerstrukturen . . . . .	1454
12.4.3.4	Stromregelung (= Current Mode Control, CMC) – Ergänzungen . . . . .	1455
12.4.3.4.1	Slope-Kompensation . . . . .	1455
12.4.3.4.2	Mittelwert-(MW-) und Spitzenwert-(SW-)Stromregelung . . . . .	1456
12.4.4	Dimensionierungsbeispiele . . . . .	1456
12.4.4.1	Nichtlückender Betrieb, direkte Regelung des Tastverhältnisses (DDC) . . . . .	1457
12.4.4.1.1	Regelstrecke . . . . .	1457
12.4.4.1.2	Reglerdimensionierung . . . . .	1461
12.4.4.2	Lückender Betrieb, Stromregelung . . . . .	1465
12.4.4.2.1	Regelstrecke . . . . .	1467
12.4.4.2.2	Reglerdimensionierung . . . . .	1470
12.5	Regelung des SEPIC-Konverters mit gekoppelten Spulen . . . . .	1471
12.5.1	Funktion von SEPIC-Konvertern mit gekoppelten Spulen . . . . .	1471
12.5.1.1	Schaltung . . . . .	1471

12.5.1.2	Funktionsweise . . . . .	1472
12.5.1.3	Wirkung der gekoppelten Spulen . . . . .	1473
12.5.1.4	Prinzipielles zur Regelung . . . . .	1474
12.5.1.5	Messung des Schalterstromes . . . . .	1475
12.5.1.6	Eingangsstrombegrenzung . . . . .	1475
12.5.1.7	Zero-Voltage Transition . . . . .	1477
12.5.1.7.1	Ausschaltverluste . . . . .	1477
12.5.1.7.2	Einschaltverluste . . . . .	1477
12.5.1.7.3	Reduktion der Verluste . . . . .	1477
12.5.2	Mögliche Reglerauslegung . . . . .	1478
12.5.2.1	SEPIC-Übertragungsfunktion . . . . .	1478
12.5.2.2	Stromregler . . . . .	1479
12.5.2.3	Überlagerter Spannungsregler . . . . .	1488
12.5.2.4	Direkte Spannungsregelung . . . . .	1489
12.5.3	Analyse der SEPIC(-Konverter)-Stromregelschleife . . . . .	1489
12.5.4	Berechnung des Kleinsignalmodells . . . . .	1494
12.6	Regelung von Schaltnetzteilen – Ergänzungen und Beispiele . . . . .	1503
12.6.1	Beispiele einfacher Übertragungsfunktionen und Bodediagramme . . . . .	1504
12.6.1.1	Grundsätzliches zur Bezeichnungweise . . . . .	1504
12.6.1.2	Schaltkreise erster Ordnung . . . . .	1506
12.6.1.2.1	Tiefpaß (Polstelle in der linken Halbebene) . . . . .	1506
12.6.1.2.2	PD-Glied (Nullstelle in der linken Halbebene) . . . . .	1507
12.6.1.2.3	PI-Glied (Nullstelle in der linken Halbebene) . . . . .	1507
12.6.1.2.4	Nullstellen in der rechten Halbebene (RHP-Zero) . . . . .	1508
12.6.1.3	Schaltkreise zweiter Ordnung . . . . .	1512
12.6.2	Analyse der Stabilität . . . . .	1517
12.6.2.1	Allgemeines . . . . .	1517
12.6.2.2	Regelung . . . . .	1517
12.6.2.3	Übertragungsfunktion . . . . .	1518
12.6.2.4	Stabilität . . . . .	1518
12.6.3	Beispiele für Übertragungsfunktionen und Regelung von Schaltnetzteilen . . . . .	1519
12.6.3.1	Einführung . . . . .	1519
12.6.3.2	Leistungskreis und Filter ( $T_3(s)$ ) . . . . .	1519
12.6.3.2.1	Allgemeines . . . . .	1519
12.6.3.2.2	Buck-Konverter im Trapezmodus . . . . .	1523
12.6.3.2.3	Buck-Boost-Konverter im Dreieckmodus . . . . .	1523
12.6.3.3	PWM-Modulator ( $T_2(s)$ ) . . . . .	1526
12.6.3.3.1	Modulator mit direkter Regelung des Tastverhältnisses . . . . .	1526
12.6.3.3.2	Modulator mit Tastverhältnisregelung und Vorsteuerung (Aufschaltung der Eingangsspannung, Berücksichtigung von Eingangsspannungsänderungen) . . . . .	1526
12.6.3.3.3	Modulator mit unterlagerter Stromregelung . . . . .	1527
a)	Buck-Konverter im Trapezmodus . . . . .	1527
b)	Buck-Boost-Schaltung im Dreieckmodus . . . . .	1529
12.6.3.4	Regler ( $T_1(s)$ ) . . . . .	1531
12.6.3.4.1	Strukturen . . . . .	1531
a)	Proportionalregler und allgemeiner Fall . . . . .	1531
b)	Regler mit einer Polstelle in der linken Halbebene (PT <sub>1</sub> -Regler) . . . . .	1531
c)	Regler mit einer Nullstelle in der linken Halbebene (PI-Regler) . . . . .	1532
d)	Regler mit zwei Pol- und Nullstellen . . . . .	1533
12.6.3.4.2	Anwendungsbereiche . . . . .	1535
a)	Allgemeines . . . . .	1535

b) Regler mit einem Pol (PT <sub>1</sub> -Regler) . . . . .	1536
c) Regler mit zwei Pol- und zwei bzw. drei Nullstellen (PD <sub>2</sub> T <sub>2</sub> - bzw. PD <sub>2</sub> T <sub>3</sub> -Regler) . . . . .	1536
12.6.3.4.3 Maximale Durchtrittsfrequenz $f_{D,max}$ . . . . .	1537
a) Mittelwert-Stromregelung . . . . .	1537
b) Spannungsregelung . . . . .	1542
12.6.3.5 Rechenbeispiele . . . . .	1544
12.6.3.5.1 Buck-Boost-Konverter im lückenden Betrieb . . . . .	1544
a) Statischer Arbeitspunkt . . . . .	1544
b) Kleine Abweichungen vom Arbeitspunkt (Kleinsignalvariation) . . . . .	1544
c) Reglerdimensionierung . . . . .	1545
12.6.3.5.2 Buck-Konverter im nichtlückenden Betrieb . . . . .	1547
a) Statischer Arbeitspunkt . . . . .	1547
b) Für kleine Abweichungen vom Arbeitspunkt (Kleinsignalvariation) . . . . .	1547
c) Regelung . . . . .	1548
12.6.4 Betragsanschmiegung – Reglerauslegung nach dem Betragsoptimum und dem Symmetrischen Optimum . . . . .	1548
12.6.4.1 Allgemeines . . . . .	1548
12.6.4.2 Optimierungsgleichungen . . . . .	1550
12.6.4.3 Betragsoptimum . . . . .	1551
12.6.4.4 Symmetrisches Optimum . . . . .	1555
12.6.5 Störungsrechnung . . . . .	1559
12.7 Steuer- und Regelschaltungen für Schaltnetzteile (SNTs) . . . . .	1561
12.7.1 Grundlagen . . . . .	1561
12.7.1.1 Steuer- und Regelschaltung auf der Primärseite . . . . .	1562
12.7.1.1.1 Durchflußwandler . . . . .	1562
12.7.1.1.2 Sperrwandler . . . . .	1563
12.7.1.1.3 Übertragung der Ausgangsspannung mit einem Hilfswandler . . . . .	1563
12.7.1.2 Steuer- und Regelschaltung auf der Sekundärseite . . . . .	1565
12.7.1.3 Aufgeteilte Steuer- und Regelschaltung . . . . .	1566
12.7.2 Die integrierten Steuerbausteine der Familien TDA 47xx und TDA 49xx . . . . .	1568
12.7.2.1 Integrierte Steuerschaltungen der Reihe TDA 47xx . . . . .	1568
12.7.2.1.1 Allgemeines . . . . .	1568
12.7.2.1.2 Schaltungsbeschreibung . . . . .	1569
12.7.2.1.3 Impuldiagramm und Erklärung der Zeitverläufe . . . . .	1573
12.7.2.1.4 Dimensionierung der IC-Beschaltung . . . . .	1577
12.7.2.2 Anwendungsbeispiel eines TDA 4718 . . . . .	1580
12.7.2.3 Anwendungen des Steuer-ICs TDA 4718 zur Stromregelung . . . . .	1581
12.7.2.4 Integrierte Steuerschaltung TDA 49xx . . . . .	1583
12.8 Neuere Regelungs-ICs für Schaltnetzteile . . . . .	1583
12.8.1 Entwicklungsgeschichte . . . . .	1583
12.8.2 Regelung mittels Voltage Mode Control . . . . .	1584
12.8.3 Regelung von Schaltnetzteilen mit Spitzenwert-Stromregelung . . . . .	1591
12.8.4 Beschreibung des UC3842 . . . . .	1592
12.8.5 Der verbesserte Baustein UCC3800 . . . . .	1598
12.8.6 Bauteile für Mittelwert-Stromregelung und PFC . . . . .	1601
12.9 Praktische Aspekte – Verbesserung der Kreuzregelung . . . . .	1601
12.9.1 Einleitung . . . . .	1601
12.9.2 Schaltungsanalyse mit unabhängigen Spulen . . . . .	1602
12.9.3 Verwendung gekoppelter Filterspulen . . . . .	1603
12.9.3.1 Wirkungsprinzip . . . . .	1603
12.9.3.2 Vorteile der Kopplung . . . . .	1611

12.9.3.3 Analyse mit äquivalentem Schaltkreis . . . . .	1612
12.9.3.4 Steuerung des Stromrippels . . . . .	1614
12.9.3.5 Schließen der Regelschleife . . . . .	1615
12.10 Literatur . . . . .	1615
Anhang 12A. Ergänzungen zu Kapitel 12 . . . . .	2791
12A.1 Ergänzung zu S. 1219f. . . . .	2791
12A.2 Ergänzung zu S. 1235f. . . . .	2791
12A.3 Ergänzung zu S. 1244f. . . . .	2791
12A.4 Ergänzung zu S. 1259 . . . . .	2792
12A.5 Ergänzung zu S. 1269 . . . . .	2792
12A.6 Ergänzung zu S. 1270ff. . . . .	2793
12A.7 Ergänzung zu S. 1292 . . . . .	2794

## Inhaltsverzeichnis Band 2

Wichtige Formelzeichen, Abkürzungen und Symbole . . . . .	LXV
<b>13. Schaltungen mit über das Gate abschaltbaren Bauelementen . . . . .</b>	<b>1619</b>
13.1 Gleichstromsteller . . . . .	1619
13.1.1 MGD / GTO-Gleichstromsteller – Allgemeines . . . . .	1619
13.1.2 Schaltungen für MGDs / GTOs in Gleichstromstellerschaltungen . . . . .	1620
13.1.2.1 Standard- <i>RCD</i> -Beschaltung . . . . .	1621
13.1.2.2 Verlustarme <i>LCD</i> -Beschaltung . . . . .	1627
13.1.3 Spezieller Gleichstromsteller . . . . .	1634
13.2 Wechselrichter . . . . .	1638
13.2.1 Allgemeines . . . . .	1638
13.2.2 Beschaltung von Ventilen in Wechselrichterschaltungen . . . . .	1639
13.2.2.1 Wechselrichter mit <i>RCD</i> -Beschaltung . . . . .	1640
13.2.2.1.1 Ausschalten eines Ventils . . . . .	1641
13.2.2.1.2 Einschalten eines Ventils . . . . .	1643
13.2.2.2 Symmetrische Wechselrichterbeschaltung (nach McMurray) . . . . .	1646
13.2.2.3 Unsymmetrische Wechselrichterbeschaltung . . . . .	1650
13.3 Zusammenfassung . . . . .	1659
13.4 Literatur . . . . .	1659
Anhang 13A. Verlustlose Turn-On- und Turn-Off- (Snubber-)Netzwerke . . . . .	2797
13A.1 Einleitung . . . . .	2797
13A.2 Anforderungen an ideale Turn-On- und Turn-Off-Snubber . . . . .	2798
13A.3 Realisierung . . . . .	2798
13A.3.1 Aufbau des Inverters . . . . .	2798
13A.3.2 Turn-Off-Snubber . . . . .	2799
13A.3.3 Turn-On-Snubber sowie Energiebetrachtung für den Turn-Off-Vorgang . . . . .	2806
13A.4 Diskussion der Ergebnisse . . . . .	2813
13A.5 Schlußfolgerungen . . . . .	2814
13A.6 Weitere Details zu den Schaltkreisen . . . . .	2815
13A.7 Ableitung der Gln. (13A.1)...(13A.3) sowie Details zu Abb. 13A.8 . . . . .	2822
13A.7.1 Ableitung von Gl. (13A.1), Energielieferung in die Tiefsetzsteller-Eingangskondensatoren $C_{R_2} \parallel C_{L_2}$ zur Energierückspeisung in den DC-Zwischenkreis . . . . .	2822
13A.7.2 Ableitung von Gl. (13A.2), Energielieferung an $C_{R_1} \parallel C_{L_1}$ beim Ausschalten von $T_1$ ohne Berücksichtigung von $C_{A_1}$ und $D_{A_1}$ . . . . .	2825
13A.7.3 Ableitung von Gl. (13A.3), Energielieferung an $C_{R_1} \parallel C_{L_1}$ beim Ausschalten von $T_1$ unter Berücksichtigung von $C_{A_1}$ und $D_{A_1}$ . . . . .	2828
13A.7.4 Details zu Abb. 13A.8 . . . . .	2833
13A.8 Literatur . . . . .	2834
Anhang 13B. <i>u</i> - <i>Zi</i> -Diagramm . . . . .	2835

<b>14. Optimierung von Netzzrückwirkungen und Lastharmonischen</b> . . . . .	<b>1661</b>
14.1 Allgemeines . . . . .	1661
14.2 Einphasige netzzrückwirkungsarme (Puls-)Gleichrichterschaltungen . . . . .	1662
14.2.1 Leistungskreise . . . . .	1662
14.2.1.1 Einführung . . . . .	1662
14.2.1.2 Gleichrichter mit nachgeschaltetem Hochsetzsteller (Boost-Konverter) . . . . .	1666
14.2.1.2.1 Hochsetzsteller ohne Potentialtrennung . . . . .	1666
A. Eigenschaften der Schaltung . . . . .	1666
B. Vorteile . . . . .	1667
C. Nachteile . . . . .	1667
14.2.1.2.2 Hochsetzsteller mit Potentialtrennung . . . . .	1667
14.2.1.3 Nachgeschalteter Tiefsetzsteller (Buck-Konverter) . . . . .	1668
A. Eigenschaften und Beschreibung der Schaltung . . . . .	1668
B. Vorteile . . . . .	1670
C. Nachteile . . . . .	1670
14.2.1.4 Nachgeschalteter Spannungsinverter (Buck-Boost-Konverter) . . . . .	1671
A. Eigenschaften der Schaltung . . . . .	1671
B. Vorteile . . . . .	1672
C. Nachteile . . . . .	1673
14.2.1.5 Nachgeschalteter Sperrwandler (Flyback-Konverter) . . . . .	1673
A. Eigenschaften der Schaltung . . . . .	1673
B. Vorteile . . . . .	1674
C. Nachteile . . . . .	1674
14.2.1.6 Nachgeschalteter SEPIC(-Konverter) . . . . .	1674
A. Eigenschaften der Schaltung . . . . .	1674
B. Vorteile . . . . .	1674
C. Nachteile . . . . .	1674
14.2.2 Regelungskonzepte für einphasige netzzrückwirkungsarme Gleichrichterstrukturen . . . . .	1675
14.2.2.1 Bestimmung der Einschaltdauer mit Hilfe eines Rampengenerators und des Einschaltzeitpunktes durch Nullstromdetektion (Betrieb an der Lückgrenze) . . . . .	1675
A. Erklärung der einzelnen Schaltungsteile . . . . .	1678
a) Stromversorgung und Energiesteuerung . . . . .	1678
b) Stromdetektion (Nullstromerfassung) . . . . .	1679
c) Abschaltung bei Überstrom . . . . .	1679
d) Rampengenerator (= Sägezahngenerator) . . . . .	1679
e) Steuerung der Einschaltdauer . . . . .	1679
f) Ausgangstreiber . . . . .	1679
B. Funktion der Schaltung im Betrieb . . . . .	1680
14.2.2.2 Bestimmung der Einschaltdauer über Spitzenwert-Stromregelung und des Einschaltzeitpunktes durch Nullstromdetektion (Betrieb an der Lückgrenze) . . . . .	1681
14.2.2.3 Bestimmung der Einschaltdauer durch Mittelwert-Stromregelung und des Einschaltzeitpunktes über feste Taktperiode (nichtlückender Betrieb) . . . . .	1683
a) Spannungsregler (mit OPV <sub>2</sub> ) . . . . .	1685
b) Multiplizierer zum Berechnen des Stromsollwertes aufgrund der folgenden gemessenen Werte . . . . .	1686
c) Stromregler (mit OPV <sub>1</sub> ) . . . . .	1686
d) Oszillatorschaltung . . . . .	1686
e) PWM-Generator . . . . .	1686
f) Steuerlogik . . . . .	1686

g) Softstart-Schaltung . . . . .	1686
h) Überspannungsschutz . . . . .	1686
i) Überstromschutz . . . . .	1686
j) Kontrollschaltung für die Spannungsversorgung des ICs . . . . .	1686
Genauere Beschreibung der einzelnen Funktionsblöcke und Dimensionierung der externen Bauteile . . . . .	1687
A. Spannungsregler . . . . .	1687
B. Multiplizierschaltung . . . . .	1687
C. Stromregler . . . . .	1689
14.3 Dreiphasige (Puls-)Gleichrichterschaltungen mit geringen Netzurückwirkungen . . . . .	1696
14.3.1 Übersicht . . . . .	1696
14.3.1.1 Diodenbrückenschaltung mit (auf Gleichstromseite) nachgeschaltetem Hochsetzsteller . . . . .	1697
14.3.1.2 Diodenbrücke und Hochsetzstellerstruktur mit Induktivitäten auf der Wechselstromseite . . . . .	1698
14.3.1.3 Hochsetzstellerstruktur mit sechs abschaltbaren Leistungshalbleitern (mit Energierückspeisung) . . . . .	1698
14.3.1.4 Hochsetzstellerstruktur mit drei netzseitigen Induktivitäten und drei bidirektionalen abschaltbaren Halbleiterschaltern (ohne Energierück- speisung) . . . . .	1699
14.3.2 Genauere Beschreibung der Leistungskreise und Steuerungen . . . . .	1700
14.3.2.1 Diodenbrückenschaltung mit nachgeschaltetem Hochsetzsteller . . . . .	1700
14.3.2.2 Diodenbrückenschaltung und Hochsetzsteller mit netzseitigen Induk- tivitäten . . . . .	1703
14.3.2.3 Struktur mit drei bzw. sechs (abschaltbaren) Leistungsschaltern . . . . .	1707
14.4 Vienna Rectifier . . . . .	1708
14.4.1 Vienna Rectifier I . . . . .	1709
14.4.2 Vienna Rectifier II . . . . .	1720
14.4.3 Zusammenfassung . . . . .	1739
14.5 Analyse der dreiphasigen AC–DC-Pulsumrichter – Raumzeigerdarstellungen, Grund- und Oberschwingungen . . . . .	1740
14.5.1 Allgemeines . . . . .	1740
14.5.2 Umrichterspannung – makroskopische Betrachtung . . . . .	1741
14.5.3 Systembeschreibung über Raumzeiger . . . . .	1745
14.5.4 Umrichterspannung – mikroskopische Betrachtung . . . . .	1747
14.5.5 Ausgangsspannung und Oberschwingungen bei Pulsbetrieb . . . . .	1748
14.5.6 Aufspaltung des Freilaufzustandes . . . . .	1753
14.5.7 Erhöhung des Aussteuerbereiches . . . . .	1758
14.5.8 Raumzeigermodulation . . . . .	1762
14.5.9 Raumzeiger für Dreiniveausysteme . . . . .	1768
14.6 Sieb- und Gleichrichterschaltungen . . . . .	1772
14.6.1 Gleichrichterschaltungen . . . . .	1772
14.6.1.1 Grundtypen von Gleichrichterschaltungen . . . . .	1772
14.6.1.1.1 Halbwellengleichrichter (Einweggleichrichter) . . . . .	1772
14.6.1.1.2 Zweiweggleichrichter . . . . .	1774
14.6.1.1.3 Brückengleichrichter . . . . .	1774
14.6.2 Siebschaltungen – Allgemeines . . . . .	1776
a) R-Gleichrichter . . . . .	1776
b) C-Gleichrichter . . . . .	1776
c) L-Gleichrichter . . . . .	1776
14.6.2.1 Strom- und Spannungskomponenten . . . . .	1776
a) R-Gleichrichter . . . . .	1777

b) C-Gleichrichter . . . . .	1777
c) L-Gleichrichter . . . . .	1777
14.6.2.2 Grundfrequenzen der Brummgrößen . . . . .	1777
14.6.2.3 Berechnungsgrundlagen für die Brummspannung . . . . .	1778
a) R-Gleichrichter . . . . .	1778
b) C-Gleichrichter . . . . .	1778
c) L-Gleichrichter . . . . .	1778
14.6.2.4 Frequenzkomponenten der Brummspannung . . . . .	1779
14.6.2.5 Kenngrößen von Siebschaltungen . . . . .	1779
a) Welligkeit der Momentanwerte . . . . .	1779
b) Welligkeit der Effektivwerte . . . . .	1779
c) Welligkeitsverhältnis der Momentanwerte . . . . .	1780
d) Siebfaktor . . . . .	1780
e) Frequenzabhängigkeit des Eingangswiderstandes der Siebschaltung . . . . .	1780
14.6.2.6 Vierpoleigenschaften . . . . .	1780
14.6.2.7 Siebschaltungen bei zeitlich wechselnder Last . . . . .	1782
14.6.3 Siebschaltungen – Spezielle Ausführungsformen . . . . .	1782
14.6.3.1 Tiefpaß-L–C-Ketten . . . . .	1782
1. Starkstromtechnische Dimensionierung . . . . .	1783
2. Dimensionierung für kleine Leistungen . . . . .	1783
14.6.3.2 L–C-Siebketten-Dimensionierung . . . . .	1784
14.6.3.3 Tiefpaß-R–C-Ketten . . . . .	1788
14.6.3.4 Frequenzsperrungen . . . . .	1789
14.6.3.5 R–C-Frequenzsperrungen (Doppel-T-Glieder) . . . . .	1791
14.6.3.6 Elektronische (aktive) Filter . . . . .	1792
14.7 Methoden für die Stromrippelminimierung . . . . .	1799
14.7.1 Ćuk-Konverter mit gekoppelten Spulen . . . . .	1799
14.7.1.1 Umformung der Struktur . . . . .	1799
14.7.1.2 Filterwirkung und Rippelunterdrückung . . . . .	1802
14.7.1.3 Erklärung der Rippelunterdrückung anhand des Superpositionsprinzips . . . . .	1803
14.7.2 Hochsetzsteller mit reduziertem Eingangsstromrippel . . . . .	1804
14.7.2.1 Schaltkreisanalyse . . . . .	1804
14.7.2.2 Vor- und Nachteile der Realisierungsvarianten eines Hochsetzstellers mit reduziertem Rippel . . . . .	1806
14.7.3 Ćuk-Konverter mit reduziertem Rippel ohne gekoppelte Spulen . . . . .	1807
14.7.3.1 Ćuk-Konvertertopologien „ohne“ Stromrippel . . . . .	1807
14.7.3.2 Einfluß eines Spannungsrippels am Koppelkondensator auf den Stromrippel . . . . .	1807
14.7.3.3 Vor- und Nachteile der Ćuk-Konverter mit reduziertem Stromrippel . . . . .	1811
14.7.4 Buck- und Boostkonverter mit integriertem Filter . . . . .	1811
14.7.5 SEPIC(-Konverter) mit reduziertem Eingangsstromrippel . . . . .	1812
14.8 Auswirkung von Welligkeiten auf der Lastseite auf Regelungen . . . . .	1815
14.9 Literatur . . . . .	1818
<b>15. Passive Bauelemente und Dimensionierungsbeispiele . . . . .</b>	<b>1823</b>
15.1 Magnetische Bauteile und Schaltungsdimensionierung . . . . .	1823
15.1.1 Allgemeines und Anwendungsgebiete . . . . .	1823
15.1.2 Kernmaterialien und Kernformen . . . . .	1823
15.1.2.1 Allgemeines . . . . .	1823
15.1.2.2 Formen des Magnetismus . . . . .	1824
15.1.2.2.1 Ferromagnetische Metalle . . . . .	1824
15.1.2.2.2 Diamagnetische Materialien . . . . .	1826

15.1.2.2.3	Paramagnetische Materialien	1826
15.1.2.2.4	Antiferromagnetismus	1826
15.1.2.2.5	Ferrimagnetismus	1826
15.1.2.2.6	Metamagnetismus	1826
15.1.2.3	Materialstrukturen und Kerntypen	1827
15.1.2.3.1	Kristalline und amorphe Metalle (Verbindungen)	1827
15.1.2.3.2	Ferritkerne	1827
15.1.2.3.3	Pulverkerne	1828
15.1.2.3.4	Eisenkerne	1829
15.1.2.4	Zusammenfassung	1829
15.1.3	Isolier-, Verguß- und Lötwerkstoffe	1829
15.1.4	Wickeldrähte für Transformator- und Spulenwicklungen	1832
15.1.5	Dimensionierung von Transformatoren und weiteren Bauelementen	1832
15.1.5.1	Beispiel: Dimensionierung eines 45 W-Sperrwandlers	1832
15.1.5.1.1	Grundlegende Bemerkungen zur Schaltung	1833
15.1.5.1.2	Betriebsart	1833
15.1.5.1.3	Festlegung des Übersetzungsverhältnisses	1834
15.1.5.1.4	Berechnung der Hauptinduktivität	1836
15.1.5.1.5	Transformatorberechnung	1839
15.1.5.1.6	Transistorspitzenstrom	1851
15.1.5.1.7	Tastverhältnis	1852
15.1.5.1.8	Diodenspitzenstrom	1853
15.1.5.1.9	Leitverluste bei Bipolartransistoren	1853
15.1.5.1.10	Leitverluste bei MOS-Transistoren	1854
15.1.5.1.11	Diodenverluste	1855
15.1.5.1.12	Ausgangskondensator	1859
15.1.5.2	Beispiel: Dimensionierung eines Durchflußwandlers	1861
15.1.5.2.1	Dimensionierung von Gleichrichter und Siebkondensator	1861
15.1.5.2.2	Versorgung der Steuerschaltung	1863
15.1.5.2.3	Dimensionierung der Steuerschaltung	1863
15.1.5.2.4	Unter- und Überspannungsüberwachung	1866
15.1.5.2.5	Auswahl und Berechnung des Transformators	1869
15.1.5.2.6	Berechnung der Drossel	1875
15.1.5.2.7	Ausgangskondensator	1877
15.1.5.3	Drahttabellen (AWG)	1880
15.1.6	Stromverdrängung in Leitern (Skin- und Proximityeffekt)	1883
15.1.7	Anwendung der Lagenisolation und spezielle Bauformen	1884
15.1.8	Aktive Klemmschaltungen	1887
15.1.9	Spulen	1887
15.2	Skin- und Proximityeffekte in Transformatorwicklungen	1889
15.2.1	Skineneffekt	1889
15.2.2	Proximityeffekt (Nähewirkung)	1893
15.2.2.1	Doppelleitung	1893
15.2.2.2	Mehrlagige Wicklung	1895
15.2.2.2.1	Verluste bei Folien-(Flachdraht-)Wicklungen (rechteckige Leiter)	1895
15.2.2.2.2	Äquivalenzen zwischen Rund- und Flachdraht	1906
15.2.2.2.3	Verluste bei Runddrahtwicklungen	1909
15.2.2.2.4	Verluste bei nichtsinusförmigen Strömen	1909
15.3	Ferritkerne in Transformatoren von Schaltnetzteilen und Minimierung der Verluste	1913
15.3.1	Ferrite und Bauformen (Beispiele)	1913
15.3.2	Minimierung der Verluste von Schaltnetzteiltransformatoren	1918
15.3.2.1	Spannungsgleichung	1918

15.3.2.2 Leistungsgleichung . . . . .	1920
15.3.2.3 Wicklungsverluste . . . . .	1921
15.3.2.4 Kernverluste . . . . .	1922
15.3.2.5 Minimierung der Verluste . . . . .	1922
15.4 Leistungsübertrager und Spulen – Entwurf und Dimensionierung . . . . .	1924
15.4.1 Magnetische Kreise für Energieübertragung und Isolation . . . . .	1924
15.4.1.1 Allgemeines . . . . .	1924
a) Hystereseverluste . . . . .	1925
b) Wirbelstromverluste . . . . .	1925
c) Resonanzverluste . . . . .	1925
15.4.1.2 Bestimmung der Schwankungsbereiche der magnetischen Induktion . . . . .	1927
15.4.1.3 Bestimmung der Kerngröße . . . . .	1928
15.4.1.4 Berechnung der Windungszahlen . . . . .	1933
15.4.2 Magnetische Kreise für Anwendungen mit Gleichstromvormagnetisierung bzw. zur Energiezwischen­speicherung . . . . .	1935
15.4.2.1 Auswahl des Kernmaterials . . . . .	1935
15.4.2.2 Bestimmung der maximalen Flußdichte . . . . .	1937
15.4.2.3 Bestimmung der Kerngröße . . . . .	1937
15.4.2.4 Berechnung der Windungszahl . . . . .	1939
15.4.2.5 Berechnung des Luftspaltes . . . . .	1939
15.4.3 Hinweise zum Entwurf von Wicklungen . . . . .	1941
15.4.3.1 Allgemeines . . . . .	1941
15.4.3.2 Transformatoren mit Teilwindungen . . . . .	1943
15.4.3.2.1 Notwendigkeit von Teilwindungen . . . . .	1943
15.4.3.2.2 Realisierung von Teilwindungen . . . . .	1944
15.5 Berechnung und Minimierung von Streuinduktivitäten . . . . .	1950
15.5.1 Allgemeines . . . . .	1950
15.5.2 Grundgesetze des magnetischen Feldes . . . . .	1950
15.5.3 Berechnung der Streuinduktivität bei konzentrischen Spulen . . . . .	1952
15.5.3.1 Grundsätzliches . . . . .	1952
15.5.3.2 Berechnung auf Basis der magnetischen Energiedichte . . . . .	1957
15.5.3.3 Berechnung über den Fluß . . . . .	1958
15.5.3.4 Verschachtelte Wicklungen . . . . .	1959
15.5.4 Ringkern und Ferritperle . . . . .	1960
15.5.5 Beziehung zwischen Kernparametern, Luftspatllängen und $A_L$ -Werten . . . . .	1962
15.6 Kondensatoren . . . . .	1963
15.6.1 Grundsätzliches zum Aufbau . . . . .	1963
a) Allgemeines . . . . .	1963
b) Elektrolytkondensatoren (Elkos) . . . . .	1963
c) Kunststofffolienkondensatoren . . . . .	1965
d) Keramikkondensatoren . . . . .	1966
e) Ausblick auf Neuentwicklungen . . . . .	1966
15.6.2 Auswahlkriterien nach Anwendung . . . . .	1966
a) Kopplungskondensatoren . . . . .	1966
b) Glättungs- und Stützkondensatoren . . . . .	1966
c) Kommutierungskondensatoren . . . . .	1967
d) Leistungskondensatoren zur Verbesserung von Leistungsfaktor und Oberschwingungsgehalt . . . . .	1967
e) Schwingkreiskondensatoren . . . . .	1967
f) Bedämpfungskondensatoren . . . . .	1968
g) Zwischenkreiskondensatoren . . . . .	1968
15.6.3 Zusammenschalten mehrerer Kondensatoren . . . . .	1968

15.6.4	Typische Kennlinien und ihre Bedeutung . . . . .	1969
15.7	Magnetische Materialien und Kondensatoren – Begriffe . . . . .	1974
15.7.1	Magnetbauteile . . . . .	1974
15.7.1.1	Kennwerte, Bezeichnungen und Definitionen . . . . .	1975
15.7.1.2	Allgemeine Bemerkungen . . . . .	1991
15.7.1.2.1	Ferromagnetismus – Weißsche Bezirke . . . . .	1991
15.7.1.2.2	Transformatoren (Übertrager) . . . . .	1992
15.7.1.2.3	Drosseln – Spulen – Induktivitäten . . . . .	1992
15.7.1.2.4	Kerne für induktive Sensoren . . . . .	1992
15.7.1.2.5	Transformatorkernauswahl für Leistungsanwendungen . . . . .	1993
a)	Definition der Vorgaben . . . . .	1993
b)	Auswahl möglicher Kernformen und Werkstoffe . . . . .	1993
c)	Eingrenzung von Kernform und Werkstoff . . . . .	1993
15.7.1.2.6	Kernmaterialien . . . . .	1993
A.	Materialgruppen . . . . .	1993
a)	(Kristalline) Eisenmetalle – Dynamoblech . . . . .	1993
b)	Amorphe Metalle . . . . .	1993
c)	Ferrite . . . . .	1994
d)	Pulververbundwerkstoffe . . . . .	1994
B.	Vergleich von (kristallinen) Metallen, Ferriten, Pulververbundwerkstoffen und amorphen Metallen . . . . .	1995
15.7.1.2.7	Kernbezeichnungen . . . . .	1995
15.7.2	Kondensatoren . . . . .	1996
15.7.2.1	Kennwerte, Bezeichnungen und Definitionen . . . . .	1996
15.7.2.2	Neue Entwicklungen: Superkondensatoren . . . . .	1997
15.7.2.2.1	Aufbau . . . . .	1998
15.7.2.2.2	Kenngößen . . . . .	1998
15.7.2.2.3	Typische Kennwerte . . . . .	1999
15.7.2.2.4	Anwendungen – Einsatzmöglichkeiten . . . . .	1999
15.7.2.3	Weiterführende Literatur . . . . .	2000
15.8	Literatur . . . . .	2000
Anhang 15A.	Übertragbare Transformatorleistung, Faktoren $C$ und $K_f$ sowie Rhombusdiagramm . . . . .	2003
15A.1	Berechnungsgrundlagen . . . . .	2003
15A.2	(Charakteristische) Faktoren für Transformatoren für typische Schaltungen . . . . .	2009
15A.2.1	Eintaktdurchflußwandler . . . . .	2009
15A.2.2	Seriengespeiste Gegentaktschaltung mit sekundärseitiger Brückengleichrichtung . . . . .	2011
15A.2.3	Seriengespeiste Gegentaktschaltung mit sekundärseitiger Mittelpunkts-gleichrichtung . . . . .	2012
15A.2.4	Parallelgespeiste Gegentaktschaltung mit sekundärseitiger Brücken-gleichrichtung . . . . .	2013
15A.2.5	Parallelgespeiste Gegentaktschaltung mit sekundärseitiger Mittelpunkts-gleichrichtung . . . . .	2015
15A.2.6	Sperrwandler . . . . .	2016
15A.3	Ableitungen der Transformatorgleichungen . . . . .	2017
15A.3.1	Sperrwandler . . . . .	2017
15A.3.2	Durchflußwandler und verwandte Strukturen . . . . .	2021
15A.4	Rhombusdiagramm . . . . .	2023
<b>16.</b>	<b>Spezielle Methoden und Anwendungen . . . . .</b>	<b>2039</b>
16.1	Überblick und typische Beispiele . . . . .	2039

16.1.1	Allgemeines . . . . .	2039
16.1.2	Stromversorgungen für höhere Leistungen . . . . .	2040
16.1.2.1	Unterbrechungsfreie Stromversorgungen (USV) . . . . .	2040
16.1.2.2	Pulsleichrichter bzw. -umrichter . . . . .	2041
16.1.3	Erzeugung von Wechselspannungen mit optimiertem Oberschwingungsgehalt . . . . .	2042
a)	Multilevel-Synthese . . . . .	2043
b)	Pulsbreiten- oder Pulsweiten-Synthese . . . . .	2043
16.1.4	Antriebstechnik . . . . .	2046
16.1.4.1	Gleichstromantriebe . . . . .	2046
16.1.4.1.1	DC-Motor im Zwei- und Vierquadrantenbetrieb . . . . .	2046
16.1.4.1.2	Feldstromversorgung von Gleichstrommaschinen . . . . .	2048
16.1.4.2	Wechselstromantriebe . . . . .	2048
16.1.5	Schaltentlastung und Erzeugung von Gleichspannungen . . . . .	2051
16.1.5.1	Allgemeines . . . . .	2051
16.1.5.2	Gleichspannungs-(DC–DC-)Konverter mit Schaltentlastung . . . . .	2052
16.1.6	Verbesserung des Schaltverhaltens . . . . .	2057
16.1.6.1	Allgemeines . . . . .	2057
16.1.6.2	Hartes Schalten . . . . .	2058
16.1.6.3	ZVS . . . . .	2058
16.1.6.4	ZCS . . . . .	2059
16.1.6.5	Einfluß von Streukapazitäten und -induktivitäten . . . . .	2061
16.1.7	Weitere Anwendungen und Schaltungsaspekte . . . . .	2065
16.1.7.1	Induktionsheizung . . . . .	2065
16.1.7.2	Schweißtechnik . . . . .	2068
16.1.7.3	Ansteuerungsprobleme . . . . .	2068
16.1.7.4	Weitere Anwendungen . . . . .	2069
16.2	Sperschwingwandler . . . . .	2069
16.2.1	Allgemeines . . . . .	2069
16.2.2	Dimensionierung und Simulation eines konkreten Beispiels . . . . .	2071
16.2.2.1	Dimensionierung . . . . .	2071
16.2.2.2	Ergebnisse der Simulation . . . . .	2073
16.2.2.3	Detaillierte Betrachtung des Umschaltvorgangs zwischen Entlade- und Ladephase . . . . .	2074
16.2.3	Modifizierte Schaltung . . . . .	2075
16.2.3.1	Schaltungsauslegung . . . . .	2075
16.2.3.2	Nachdimensionierung der Schaltung . . . . .	2076
16.2.4	Berücksichtigung einer Streuinduktivität im Ladekreis . . . . .	2078
16.2.4.1	Allgemeines . . . . .	2078
16.2.4.2	Funktion der Transistorschutzschaltung . . . . .	2079
16.2.5	Abhängigkeit der Ausgangsspannung $U_{La}$ vom Lastwiderstand $R_{La}$ . . . . .	2084
16.2.6	Modellparameter für PSPICE . . . . .	2086
16.3	Schaltungen für Beleuchtungstechnik und PFC . . . . .	2092
16.3.1	Allgemeines . . . . .	2092
16.3.2	Typen von Entladungslampen . . . . .	2092
16.3.3	Aufbau und Betriebsverhalten der Leuchtstoffröhren als Beispiel für Niederdruck-Entladungslampen . . . . .	2093
16.3.4	Ansteuerschaltungen für den Betrieb von Niederdruck-Entladungslampen – Allgemeines . . . . .	2095
16.3.5	Konventionelle Vorschaltgeräte . . . . .	2095
16.3.6	Elektronische Vorschaltgeräte – Allgemeines . . . . .	2096
16.3.7	Schaltungen von Vorschaltgeräten mit Gleichspannungseingang . . . . .	2097
16.3.7.1	Elektronisches Vorschaltgerät mit selbstschwingender Brücke . . . . .	2098

16.3.7.1.1	Allgemeine Erklärung der Schaltungsfunktion und Erläuterungen zur Bauteildimensionierung . . . . .	2098
16.3.7.1.2	Herleitung der Schaltungsstruktur . . . . .	2099
16.3.7.1.3	Anschwingen der Wechselrichterhalbbrücke vor dem Zünden der Lampe . . . . .	2100
16.3.7.1.4	Verhalten nach dem Zünden . . . . .	2100
16.3.7.2	Elektronisches Vorschaltgerät mit integrierter Ansteuerschaltung . . .	2106
a)	Oszillatorschaltung . . . . .	2107
b)	Steuerlogik . . . . .	2108
c)	Totzeitglied ( $T_t$ ) . . . . .	2108
d)	Pegelwandler . . . . .	2108
e)	Oberer Halbbrückentreiber . . . . .	2108
16.3.7.3	Vorkehrungen zur Optimierung des Netzverhaltens (Aspekte zum Netzverhalten) . . . . .	2109
16.3.8	Ansteuerschaltungen (ICs) für Leuchtstofflampen . . . . .	2110
16.3.8.1	Allgemeines . . . . .	2110
16.3.8.2	PFC-Eingangsstufe . . . . .	2113
16.3.8.3	Vorschaltgerät . . . . .	2116
1.	UVLO-Modus . . . . .	2118
2.	Vorheizen . . . . .	2119
3.	Zündphase . . . . .	2119
4.	Arbeitsphase (Dimmphase) . . . . .	2121
16.3.8.4	Spannungsversorgungen und Ansteuerfunktionen . . . . .	2121
16.3.8.4.1	Prinzipielle Arbeitsweise . . . . .	2121
16.3.8.4.2	Zusätzliche Funktionen . . . . .	2123
a)	Dimmodus . . . . .	2123
b)	Strommessung . . . . .	2123
c)	Fehlermodus . . . . .	2123
16.3.9	Einstufen-Power-Factor-Correction (PFC) mit regelbarer Ausgangsgleichspannung und Induktivität im Eingangskreis . . . . .	2124
16.3.9.1	Einleitung . . . . .	2124
16.3.9.2	Schaltungsanalyse . . . . .	2125
16.3.9.2.1	Allgemeines . . . . .	2125
16.3.9.2.2	Betriebszustände . . . . .	2126
16.3.9.3	Zusammenfassung . . . . .	2130
16.3.9.3.1	Kondensatorstrom und -spannung . . . . .	2130
16.3.9.3.2	Leitdauer . . . . .	2130
16.3.10	Einstufige Lampenansteuerungen mit integrierter PFC ohne Induktivität im Eingangskreis . . . . .	2131
16.3.10.1	Einführung . . . . .	2131
16.3.10.2	Spannungsquellenprinzip . . . . .	2133
16.3.10.2.1	Allgemeines . . . . .	2133
16.3.10.2.2	PFC-Funktion . . . . .	2135
16.3.10.2.3	Inverterfunktion . . . . .	2140
16.3.10.3	Stromquellenprinzip . . . . .	2145
16.3.10.4	Kombiniertes Strom- und Spannungsquellenprinzip . . . . .	2154
16.3.10.5	Anmerkung zum Betriebsverhalten und zur Dimensionierung . . . . .	2156
16.4	Matrixumrichter . . . . .	2157
16.4.1	Grundidee . . . . .	2157
16.4.1.1	Entwurf und einphasige Last . . . . .	2158
16.4.1.2	Dreiphasige Last . . . . .	2162
16.4.2	Realisierungsmöglichkeiten . . . . .	2165

16.4.2.1	Idealisierte Pulsmuster . . . . .	2165
16.4.2.2	Schaltelemente und Steuerung . . . . .	2168
16.4.3	Versuchsergebnisse . . . . .	2173
16.4.4	Zusammenfassung . . . . .	2173
16.5	Solarkonverter . . . . .	2175
16.5.1	Einleitung . . . . .	2175
16.5.1.1	Historisches und Allgemeines . . . . .	2175
16.5.1.2	Wirkungsgrad und energetische Amortisation . . . . .	2175
16.5.2	Solarzellen . . . . .	2176
16.5.2.1	Aufbau . . . . .	2176
16.5.2.2	Ersatzschaltbilder . . . . .	2177
16.5.2.3	Kennlinien der Solarzelle . . . . .	2179
16.5.2.3.1	Dunkelkennlinie . . . . .	2179
16.5.2.3.2	Kennlinie der bestrahlten Solarzelle . . . . .	2179
16.5.2.4	Arbeitspunkt von Solarzellen . . . . .	2181
16.5.3	Energiespeicher . . . . .	2182
16.5.4	Laderegler . . . . .	2183
16.5.4.1	Serienregler . . . . .	2184
16.5.4.2	Shuntregler . . . . .	2184
16.5.5	Anpaßwandler . . . . .	2185
16.5.6	MPP-Tracker . . . . .	2187
16.5.6.1	Arbeitsprinzipien von MPP-Trackern . . . . .	2188
16.5.6.1.1	Indirekte MPP-Tracker (Vorsteuerung) . . . . .	2188
a)	Jahreszeitabhängige Nachführung (Umschaltung) der Solarpaneelspannung . . . . .	2188
b)	Temperaturgeführte Arbeitspunktspannung . . . . .	2188
c)	Messung der Solargeneratorleerlaufspannung . . . . .	2188
16.5.6.1.2	Direkte MPP-Tracker (Regelung) . . . . .	2188
16.5.6.2	MPP-Tracker beim Laden von Akkumulatoren . . . . .	2188
16.5.7	Wechselrichter . . . . .	2190
16.5.7.1	Anforderungen . . . . .	2190
16.5.7.2	Konzepte . . . . .	2191
16.5.7.3	Anpassung Solargenerator – Wechselrichter . . . . .	2193
16.5.8	Photovoltaiksysteme . . . . .	2194
16.5.8.1	Autarke Photovoltaikanlagen bzw. Inselsysteme . . . . .	2194
16.5.8.2	Netzgekoppelte Systeme . . . . .	2196
16.5.9	Trends . . . . .	2198
16.5.9.1	Allgemein . . . . .	2198
16.5.9.2	Inselanlagen . . . . .	2198
16.5.9.3	Netzgekoppelte Anlagen . . . . .	2198
16.5.10	Normen und Vorschriften . . . . .	2199
16.5.11	Schutz- und Sicherheitsmaßnahmen . . . . .	2199
16.5.12	ISO 14000 – Einführung in die Photovoltaikindustrie . . . . .	2201
16.5.12.1	Markante Punkte der Norm ISO 14000 . . . . .	2202
16.5.12.2	Schlüsselmerkmale der Norm ISO 14001 . . . . .	2202
16.5.12.3	Wichtige Aspekte von ISO 14001 zu Umweltfragen . . . . .	2202
16.6	Verstärker . . . . .	2202
16.6.1	Einleitung . . . . .	2202
16.6.2	Leistungsverstärker im D-Betrieb . . . . .	2203
16.6.2.1	Allgemeines und Schaltverstärker mit Halbbrücke . . . . .	2203
16.6.2.2	Schaltverstärker in Multizellenstruktur (Multicellverstärker) mit Vollbrücken . . . . .	2208

16.6.2.3	Strom- und Spannungsregelung . . . . .	2212
16.6.2.3.1	Allgemeines . . . . .	2212
16.6.2.3.2	Modellbildung und grundsätzliche Voraussetzungen . . . . .	2212
16.6.2.3.3	Dimensionierung des Reaktanzfilters . . . . .	2217
16.6.2.3.4	Kaskadierte Strom-/ Spannungsregelung . . . . .	2219
16.6.2.3.5	Dimensionierung des Stromreglers . . . . .	2220
a)	Allgemeines . . . . .	2220
b)	Zusammenhang zwischen den Kenngrößen . . . . .	2223
c)	Phasenminimumsysteme . . . . .	2224
d)	Bodediagramm . . . . .	2224
e)	Bestimmung der Reglerparameter $k_I$ und $T_I$ unter Beachtung der Beschränkung der Durchtrittsfrequenz des Stromregelkreises . . . . .	2225
16.6.2.3.6	Dimensionierung des Spannungsreglers . . . . .	2230
16.6.2.4	Asymmetrischer Leistungs-Schaltverstärker (ALS-Verstärker) . . . . .	2234
16.6.2.4.1	Prinzipielle Funktionsweise . . . . .	2234
16.6.2.4.2	Dimensionierung des Ausgangsfilters . . . . .	2240
16.6.2.4.3	Regelung . . . . .	2240
16.6.3	Kombination von Schalt- und Linearverstärkern . . . . .	2241
16.6.3.1	Allgemeines . . . . .	2241
16.6.3.2	Direkte Kopplung von linearem und schaltendem Verstärker . . . . .	2241
16.6.3.3	Asymmetrischer Leistungs-Schaltverstärker mit hybridem Ausgangs- filter . . . . .	2245
16.6.4	Verstärker für Audiosysteme und weitere Anwendungen . . . . .	2247
16.6.4.1	Allgemeines zur Klassifizierung von Leistungsverstärkern . . . . .	2247
16.6.4.2	Klasse E-Verstärker (für frequenzabgestimmte Systeme, z. B. Sender) . . . . .	2249
16.7	Netzgekoppelte Pulsumrichter – Aktive Rippelkompensation . . . . .	2252
16.7.1	Einleitung . . . . .	2252
16.7.2	Grundkonzepte, netz- und schaltfrequente Oberschwingungen . . . . .	2254
16.7.3	Kopplungsstufe . . . . .	2262
16.7.4	Regelung der Filterumrichterspannung . . . . .	2264
16.7.5	Signalrippelfilter (SRF) . . . . .	2267
16.7.6	Filterstromregelung . . . . .	2271
16.7.7	Spannungsregelung für den Filterumrichter . . . . .	2275
16.7.8	Niederfrequente Schwingungen und Regelung des Hauptumrichters . . . . .	2276
16.7.9	Anwendung der Multizellenstruktur . . . . .	2281
a)	Stromregelung . . . . .	2281
b)	Abblockkondensator $C_K$ . . . . .	2283
c)	Dämpfungswiderstand $R_D$ . . . . .	2285
d)	Verlustabdeckung . . . . .	2286
e)	Signalrippelfilter (SRF) . . . . .	2287
16.7.10	Zusammenfassung . . . . .	2288
16.8	Leistungselektronik im KFZ . . . . .	2291
16.8.1	Einleitung . . . . .	2291
16.8.2	Spannungsregelung im KFZ . . . . .	2291
16.8.2.1	Konventionelle Linearregler . . . . .	2292
16.8.2.2	Linearregler mit kleinem Spannungsabfall LDO (= Low Drop Out) . . . . .	2293
16.8.2.3	Betrachtung des LDO-Regelkreises . . . . .	2294
16.8.2.4	Überbrückung von Spannungseinbrüchen . . . . .	2299
16.8.2.5	Spannungsregler mit hoher Zuverlässigkeit und geringen Störungen . . . . .	2301
16.8.3	Ansteuerung von Magnetventilen (z. B. für elektronische Einspritzung) . . . . .	2301
16.8.3.1	Allgemeines . . . . .	2301
16.8.3.2	Magnetventilansteuerung mit L9140 . . . . .	2302

16.8.4	Antriebssysteme mit Brennstoffzellen . . . . .	2304
16.8.4.1	Allgemeines . . . . .	2304
16.8.4.2	Bidirektionaler DC–DC-Konverter . . . . .	2305
16.8.5	Pulswechselrichter . . . . .	2308
16.8.5.1	Allgemeines . . . . .	2308
16.8.5.2	Multizellenkonverter . . . . .	2308
16.8.5.3	Multilevelkonverter . . . . .	2312
16.8.6	Bordnetze mit 42 V . . . . .	2314
16.8.6.1	Allgemeines . . . . .	2314
16.8.6.2	DC–DC-Konverter für 42 V-Bordsysteme . . . . .	2314
16.8.6.3	Smart Power Devices . . . . .	2317
16.8.6.3.1	Sicherheitseinrichtungen . . . . .	2317
16.8.6.3.2	Active Clamping . . . . .	2319
16.8.6.3.3	Unterbrechung der Masse . . . . .	2319
16.8.7	Beleuchtungstechnik . . . . .	2320
16.8.8	Brennstoffzellen . . . . .	2321
16.8.8.1	Einleitung . . . . .	2321
16.8.8.2	Brennstoffzellensysteme . . . . .	2324
16.8.8.3	DMFC . . . . .	2325
16.8.8.3.1	Einleitung . . . . .	2325
16.8.8.3.2	Funktionsweise . . . . .	2325
16.8.8.3.3	Stationäre Kennlinien . . . . .	2327
16.8.8.4	Dynamisches Verhalten der Brennstoffzellen . . . . .	2329
16.8.8.5	DMFC-Antrieb . . . . .	2331
16.9	Beeinflussungen der Arbeitsweise . . . . .	2333
16.9.1	Allgemeines . . . . .	2333
16.9.2	Wechselrichterkippen und Überströme zufolge Netzspannungseinbrüchen und -ausfällen bei netzgeführten Systemen . . . . .	2333
16.9.3	Umrichterfehler und Möglichkeiten zur Korrektur . . . . .	2339
16.9.3.1	Ursachen von Umrichterfehlern . . . . .	2339
a)	Schaltzeitenfehler . . . . .	2339
b)	Ventilspannungsfehler . . . . .	2340
16.9.3.2	Korrekturmaßnahmen . . . . .	2344
16.9.4	Einfluß von Streuinduktivitäten . . . . .	2344
16.9.4.1	Gegentaktwandler . . . . .	2344
16.9.4.2	Stromverdopplerschaltung . . . . .	2365
16.9.5	Einfluß der Magnetisierungsströme . . . . .	2380
16.9.6	Entlastungsschaltungen – Reduktion von Schaltverlusten und Einfluß parasitärer Elemente . . . . .	2404
16.10	Literatur . . . . .	2414
<b>17.</b>	<b>Neuere Methoden der elektromagnetischen Verträglichkeit, CE-Kennzeichnung . . . . .</b>	<b>2423</b>
17.1	Allgemeines . . . . .	2423
17.1.1	Grundlegende Begriffsdefinitionen . . . . .	2424
17.1.2	Störfestigkeit (Passive EMV) . . . . .	2425
17.1.3	Störaussendungen (Aktive EMV) . . . . .	2426
a)	Funkstörspannung . . . . .	2426
b)	Funkstörfeldstärke . . . . .	2426
c)	Funkstörleistung . . . . .	2427
d)	Funkstörstrahlungsleistung . . . . .	2427
e)	Netzoberschwingungen . . . . .	2427
f)	Netzspannungsschwankungen . . . . .	2427

17.1.4 Zusammenfassung . . . . .	2427
17.2 EMV-Analyse und Störfähigkeit (Passive EMV) . . . . .	2427
17.2.1 Theoretische EMV-Analyse . . . . .	2428
1. Beugungsmethode . . . . .	2429
2. Momentenmethode . . . . .	2429
3. Finite Elemente- bzw. Differenzen-Methode . . . . .	2430
17.2.2 EMV-Funktionstest . . . . .	2430
17.2.3 Betrachtete physikalische Größen . . . . .	2431
A. Absolute Pegel . . . . .	2432
a) Störpegel . . . . .	2432
b) Störschwellenpegel . . . . .	2432
c) Nutzpegel . . . . .	2432
B. Relative Pegel . . . . .	2432
a) Störabstand . . . . .	2432
b) Störsicherheitsabstand . . . . .	2432
17.2.4 Zusammenfassung . . . . .	2432
17.3 Kopplungsmechanismen . . . . .	2433
17.3.1 Störungskopplung – Grundlagen . . . . .	2433
a) Gleichtaktstörungen . . . . .	2435
b) Gegentaktstörungen . . . . .	2435
17.3.2 Galvanische Kopplung . . . . .	2436
17.3.2.1 Galvanische Kopplung zwischen Betriebsstromkreisen . . . . .	2437
17.3.2.2 Masseschleifenkopplung . . . . .	2438
17.3.3 Kapazitive Kopplung . . . . .	2438
17.3.4 Induktive Kopplung . . . . .	2439
17.3.5 Elektromagnetische Kopplung . . . . .	2441
17.3.5.1 Wellenleiterkopplung . . . . .	2441
17.3.5.2 Strahlungskopplung . . . . .	2442
17.3.6 Identifikation von Kopplungsmechanismen . . . . .	2444
17.4 Störquellen (Aktive EMV) . . . . .	2445
17.4.1 Einteilung nach dem Spektrum . . . . .	2446
17.4.2 Schmalbandige Störquellen . . . . .	2446
17.4.2.1 Systeme mit Netzurückwirkungen – Allgemeines . . . . .	2446
17.4.2.2 Leistungselektronische Schaltungen . . . . .	2448
17.4.2.3 HF-Generatoren . . . . .	2449
17.4.2.4 Starkstromleitungen . . . . .	2450
17.4.3 Intermittierende Breitbandstörquellen . . . . .	2450
17.4.3.1 Grundstörpegel („Elektrosmog“) . . . . .	2450
17.4.3.2 Kommutatormotoren . . . . .	2450
17.4.3.3 KFZ-Zündanlagen . . . . .	2451
17.4.3.4 Gasentladungslampen . . . . .	2451
17.4.3.5 Hoch- und Mittelspannungsfreileitungen . . . . .	2451
17.4.4 Transiente Breitbandstörungen . . . . .	2452
17.4.4.1 Elektrostatische Entladungen . . . . .	2452
17.4.4.2 Geschaltete Induktivitäten . . . . .	2454
17.4.4.3 Transienten in Versorgungsnetzen . . . . .	2456
17.4.4.4 Blitze – LEMP . . . . .	2456
17.4.4.5 High Energy Electromagnetic Pulse – HEMP . . . . .	2458
17.4.5 Umgebungsklassen . . . . .	2458
17.4.5.1 Leitungsgebundene Störungen . . . . .	2459
17.4.5.2 Störstrahlung . . . . .	2460
17.5 Störsignale an der Störsenke (Passive EMV) . . . . .	2460

17.5.1 Auswirkung auf Bauelemente . . . . .	2460
17.5.2 Störfestigkeit bei analogen Signalen . . . . .	2462
17.5.3 Störfestigkeit bei digitalen Signalen . . . . .	2462
17.5.4 Ermittlung der Störfestigkeit durch Prüfungen . . . . .	2464
17.5.4.1 Simulation leitungsgebundener Störungen . . . . .	2465
a) Breitbandige energiearme Schaltspannungsstörungen (Bursts) . . . . .	2465
b) Breitbandige energiereiche Überspannungen (Surges) . . . . .	2465
c) Niederfrequenzstörungen in Niederspannungsnetzen (ms-Impulse) . . . . .	2467
d) Elektrostatische Entladungen . . . . .	2467
e) Schmalbandige Störungen . . . . .	2468
17.5.4.2 Simulation quasistationärer und transientscher Felder (elektromagnetischer Wellen) . . . . .	2468
a) Schmalbandige Störfelder . . . . .	2468
b) Breitbandige elektromagnetische Wellenfelder . . . . .	2469
c) Simulation quasistationärer Felder (elektromagnetischer Wellen) durch Strominjektion . . . . .	2469
17.6 Reduktion von Störungen (der aktiven EMV) und Erhöhung der Störfestigkeit (der passiven EMV) . . . . .	2470
17.6.1 Allgemeines . . . . .	2470
17.6.2 Optimierung der Leitungsführung . . . . .	2471
17.6.2.1 Leitungstypen . . . . .	2471
17.6.2.2 Verlegung des Bezugspotentials (Erd- und Masseleitungen) . . . . .	2471
17.6.2.3 Verlegung von Signalleitungen . . . . .	2474
17.6.2.4 Verlegung von Versorgungsleitungen . . . . .	2476
17.6.3 Filterung . . . . .	2478
17.6.3.1 Filterarten . . . . .	2479
17.6.3.2 Aufbau von Filtern . . . . .	2480
17.6.3.3 Entstörfilter . . . . .	2484
17.6.4 Überspannungsableiter . . . . .	2490
17.6.5 Optokoppler und Lichtleiter . . . . .	2491
17.6.6 Trenntransformatoren . . . . .	2491
17.6.7 Differenzverstärker . . . . .	2491
17.6.8 Allgemeine Maßnahmen gegen kapazitive Kopplung . . . . .	2493
17.6.9 Allgemeine Maßnahmen gegen induktive Kopplung . . . . .	2494
17.6.10 Maßnahmen bei Wellenleiter- und Strahlungskopplung . . . . .	2494
17.6.10.1 Allgemeines . . . . .	2494
17.6.10.2 Elektromagnetische Schirme . . . . .	2495
17.6.10.2.1 Berechnung mittels Impedanzkonzeptes . . . . .	2496
1. Reflexionsdämpfung $R$ . . . . .	2496
2. Absorptionsdämpfung $A$ . . . . .	2498
3. Korrekturterm für multiple Reflexionen $B$ . . . . .	2499
17.6.10.2.2 Konkreter Schirmaufbau . . . . .	2499
1. Schirmmaterial . . . . .	2499
a) Alle Fernfelder, elektrische und höherfrequente magnetische Nahfelder ( $> 10$ kHz) . . . . .	2499
b) Niederfrequente magnetische Nahfelder ( $\leq 10$ kHz) . . . . .	2500
2. Abgeschlossenheit des Schirmes . . . . .	2500
3. Erdung von Schirmen . . . . .	2500
17.6.10.3 Erdung von Kabelschirmen . . . . .	2501
a) Schirm als Teil des Betriebsstromkreises . . . . .	2501
b) Schirm mit reiner Schirmfunktion . . . . .	2501
17.6.11 Maßnahmen zur Reduktion der Störaussendung von Quellen . . . . .	2502

17.6.12 Allgemeines zur Verbesserung der Störfestigkeit . . . . .	2503
17.6.12.1 Grundsätzliches . . . . .	2503
17.6.12.2 Maßnahmen und Gesichtspunkte bei analogen Systemen . . . . .	2503
17.6.12.3 Maßnahmen und Gesichtspunkte bei digitalen Systemen . . . . .	2503
17.7 EMV-Normung und CE-Kennzeichnung . . . . .	2504
17.7.1 Einführung und Struktur von Normen und Richtlinien . . . . .	2504
17.7.2 Vorgangsweise bei der CE-Kennzeichnung . . . . .	2506
A) CE-Modulverfahren . . . . .	2507
B) Dokumentation und Konformitätserklärung . . . . .	2508
C) Inverkehrbringen . . . . .	2508
17.7.3 Maschinenrichtlinie . . . . .	2509
17.7.4 Niederspannungsrichtlinie . . . . .	2510
17.7.5 EMV-Richtlinie (Ermittlung von Störfestigkeit und Störaussendung durch Prüfungen) . . . . .	2512
17.7.6 CE-Kennzeichnung bei Stromversorgungen . . . . .	2519
17.7.7 CE-Kennzeichnung in der elektrischen Antriebstechnik . . . . .	2520
17.8 Normgerechte Prinzipien zur EMV-Störfestigkeitsmessung . . . . .	2521
17.8.1 Störfestigkeit gegen schnelle elektrische Transienten (Bursts) . . . . .	2522
17.8.2 Störfestigkeit gegen Stoßspannungen (Surges) . . . . .	2524
17.8.3 Störfestigkeit gegen elektrostatische Entladungen (ESD) . . . . .	2529
17.8.4 Störfestigkeit gegen Hochfrequenzeinstrahlung (AM = Amplitudenmodulation) . . . . .	2531
17.8.5 Störfestigkeit gegen Hochfrequenzeinstrahlung (PM = Pulsmodulation) . . . . .	2533
17.8.6 Störfestigkeit gegen HF-Bestromung auf Leitungen . . . . .	2534
17.8.7 Störfestigkeit gegen Spannungseinbrüche, Kurzzeitunterbrechungen und Spannungsschwankungen . . . . .	2534
17.9 Normgerechte Prinzipien zur Störaussendungsmessung . . . . .	2536
17.9.1 Leitungsgebundene Störaussendungen (150 kHz ... 30 MHz) . . . . .	2537
17.9.2 Oberschwingungen . . . . .	2540
17.9.3 Flicker . . . . .	2543
17.9.4 Strahlungsgebundene Störaussendungen . . . . .	2543
17.10 Einteilungsgrundsätze der Störungsarten und praktische Hinweise . . . . .	2549
17.10.1 Einteilung nach technisch-physikalischen Gesichtspunkten . . . . .	2549
17.10.2 Vergleich der größtenteils genormten Störimpulse und der Netzspannungsbeeinträchtigungen nach Größe und Zeitdauer . . . . .	2550
17.10.3 Einteilung nach „Ursache und Wirkung“ . . . . .	2552
17.10.4 Praktische Hinweise zur Störungsproblematik der Leistungselektronik . . . . .	2552
17.10.4.1 Störquellen in Schaltnetzteilen . . . . .	2552
17.10.4.2 Ansatzpunkte zur EMV-Optimierung . . . . .	2556
17.10.4.3 Maßnahmen zur Minimierung von Störungen . . . . .	2556
17.10.4.4 Bauelemente für die Entstörung – Maßnahmen zur nachträglichen Entstörung . . . . .	2557
17.11 Historische Entwicklung der Funkstörnormen und aktuelle Normwerte . . . . .	2561
17.11.1 Aktualisierte Werte zu den leitungsgebundenen Störgrenzwerten nach Abschnitt 7.3.3 und historischer Überblick . . . . .	2561
17.11.2 Aktualisierte Werte zu den Geräusch- und Längsspannungen (ergänzend zu Abschnitt 7.3.2) . . . . .	2564
17.11.3 Aktualisierte Störgrenzwerte bei Abstrahlung (ergänzend zu Abschnitt 7.3.4) . . . . .	2564
17.12 Beeinflussung von Nachrichtenleitungen durch Schaltungen der Leistungselektronik – Analytische Berechnung . . . . .	2566
17.12.1 Allgemeines . . . . .	2566
17.12.1.1 Motivation zur analytischen EMV-Behandlung . . . . .	2566
17.12.1.2 Überblick zur praktischen Bedeutung vorliegender Analyse . . . . .	2566

17.12.2	Prinzipielle Gesichtspunkte zur Berechnung der Starkstrombeeinflussung für Nachrichtenkabel . . . . .	2567
17.12.2.1	Im Bereich von Drehstromanlagen . . . . .	2567
17.12.2.1.1	Beeinflussende Leitung . . . . .	2567
17.12.2.1.2	Beeinflußtes Nachrichtenkabel . . . . .	2568
17.12.2.2	Im Bereich von elektrischen Bahnen . . . . .	2568
17.12.2.2.1	Beeinflussende Leitung (Fahrdraht) . . . . .	2568
17.12.2.2.2	Beeinflußtes Nachrichtenkabel . . . . .	2569
17.12.3	Grenzwerte für Spannungen bei Beeinflussungen . . . . .	2570
17.12.3.1	Maximalwerte für Geräusch- und Fremdspannungen . . . . .	2570
17.12.3.2	Maximalwerte von Gefährdungsspannungen . . . . .	2570
17.12.4	Berechnungsformel nach VDE . . . . .	2571
17.12.5	Magnetfeld eines stromdurchflossenen Leiters in einem Hohlzylinder aus Stahl	2572
17.12.6	Fluß in der Schleife des Nachrichtensystems . . . . .	2594
17.12.7	Oberschwingungsgehalt des Speisestromes von thyristorgesteuerten Verbrau- chern (Gleichstrommotor-Antrieb) und Gefährdungsspannung . . . . .	2601
17.12.7.1	Idealisiertes Zeitverhalten . . . . .	2601
17.12.7.2	Nichtideales Verhalten . . . . .	2602
17.12.8	Oberschwingungsgehalt und Gefährdungsspannung bei Lastkurzschluß . . . . .	2603
17.12.8.1	Gleiche Stromformen in allen drei Phasenleitern . . . . .	2603
17.12.8.2	Ausfall einer Phase . . . . .	2604
17.12.8.3	Zusammenfassung . . . . .	2605
17.13	Literatur . . . . .	2606
<b>Namen- und Sachverzeichnis . . . . .</b>		<b>2611</b>
<b>Verzeichnis der Tafeln und Tabellen . . . . .</b>		<b>2785</b>

<http://www.springer.com/978-3-658-04898-3>

Leistungselektronik

Ein Handbuch Band 1 / Band 2

Zach, F.

2015, CXL, 2877 S. 1574 Abb. In 2 Bänden, nicht einzeln  
erhältlich., Hardcover

ISBN: 978-3-658-04898-3