

Inhalt – Übersicht – Band 1

Wichtige Formelzeichen, Abkürzungen und Symbole	LXV
1. Einleitung	1
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
2. Mathematische und elektrotechnische Grundlagen	6
2.1 Mathematische Grundlagen	6
2.2 Elektrotechnische Grundlagen	55
2.3 Literatur	70
Anhang 2A. Winkelfunktionen – Additionstheoreme	72
3. Bauelemente der Leistungselektronik	73
3.1 Allgemeines	73
3.2 Einführung in die Grundbegriffe der Halbleitertechnik	73
3.3 Diode	74
3.4 Transistoren	79
3.5 Thyristoren	92
3.6 Vergleich von Transistor und Thyristor	123
3.7 Weitere (klassische) Bauelemente der Leistungselektronik	126
3.8 Literatur	128
4. Leistungsteil leistungselektronischer Schaltungen	131
4.1 Klassifikation leistungselektronischer Schaltungen	131
4.2 Fremdgeführte Schaltungen	134
4.3 Selbstgeführte Schaltungen	246
4.4 Literatur	333
Anhang 4A. Dimensionierungsvergleich für Antriebe mit und ohne Leistungselektronik	335
Anhang 4B. Mindestzeiten bei Löschschaltungen	355
Anhang 4C. Graphische Analyse, Betriebskennlinien und Löschkreisstrukturen	365
Anhang 4D. Bemerkungen zu den Tafeln 4.1 und 4.2	375
Anhang 4E. Dimensionierungshinweise	378
5. Steuerung und Betrieb leistungselektronischer Schaltungen (Steuerungskreise, Schaltungen für Antriebe und Regelungen)	395
5.1 Allgemeines	395
5.2 Steuerungskreise für Phasenanschnitt sowie für Wechsel- und Drehstromsteller	396

5.3	Steuerungskreise für Nullspannungssteuerung (Impulspaketsteuerung)	404
5.4	Steuerungen bei Antrieben mit netzgeführten Stromrichtern	409
5.5	Steuerungsmethoden für Gleichstromsteller	430
5.6	Steuerungsmethoden für selbstgeführte Wechselrichter im allgemeinen	436
5.7	Spezielle Gesichtspunkte zu den Steuerungsmethoden für Umrichter mit Zwischenkreis	449
5.8	Direktumrichter und ihre Steuerungen	454
5.9	Transvektorregelung	461
5.10	Weitere Steuerungsarten	462
5.11	Literatur	463
6.	Netz- und Lastverhalten leistungselektronischer Schaltungen	465
6.1	Prinzipielles zu den Netzurückwirkungen	465
6.2	Leistungsfaktor und Oberschwingungen	475
6.3	Maßnahmen zur Verbesserung des Leistungsfaktors und des Oberschwingungsgehaltes	493
6.4	Pulszeitsteuerung zur Oberschwingungsgehalts- und Leistungsfaktoroptimierung	512
6.5	Filter (Saugkreise, Siebkreise)	519
6.6	Transformatoren für Stromrichter	531
6.7	Literatur	559
7.	Funkstörungen (elektromagnetische Beeinflussungen, EMB) und elektromagnetische Verträglichkeit (EMV)	562
7.1	Einführung	562
7.2	Überblick über die Entstehung und Reduzierung elektromagnetischer Beeinflussungen	565
7.3	Vorschriften, Normen und Meßmethoden	568
7.4	Berechnungen von Beeinflussungsspannungen	575
7.5	Entstörungsmaßnahmen	576
7.6	Literatur	579
8.	Anwendungen und spezielle Probleme der Leistungselektronik (Ergänzungen und Überblick)	582
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
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
9. Zeitschriften, Normen und Vorschriften, Konferenzen und Sammelwerke	618
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
10. Neuere aktive Bauelemente, Ansteuerungen und Beschaltungen	629
10.1 Einführung	629
10.2 Dioden in der Leistungselektronik	635
10.3 Bipolare Leistungstransistoren und Entlastungsnetzwerke	640
10.4 Gate Turn-Off Thyristoren (GTOs)	658
10.5 Power-MOSFET	668
10.6 IGBT	690
10.7 IGCT und Vergleich mit dem IGBT	754
10.8 MOS-Controlled Thyristor (MCT)	773
10.9 Ansteuerschaltungen für MGDs	781
10.10 Cool-MOS	831
10.11 Static Induction Transistor (SIT) und Thyristor (SITh)	839
10.12 Trench-Elemente und MCD-Strukturen	846
10.13 Smart-Power-ICs	858
10.14 Neue Bauelemente der Leistungselektronik und zukünftige Entwicklungen	875
10.15 Kennwerte, Abkürzungen und Definitionen	904
10.16 Literatur	914
11. Strukturen der Schaltnetzteile	921
11.1 Überblick und Grundstrukturen ohne Potentialtrennung	921
11.2 Potentialgetrennte Wandler	968
11.3 Schaltnetzteilstrukturen höherer Ordnung	1020
11.4 Vergleich von Konvertertopologien und Ergänzungen	1059
11.5 Resonante, Quasi- und Pseudoresonante Schaltungen	1081
11.6 Aktuelle Anforderungen an die Leistungselektronik	1148
11.7 Praktische Aspekte	1187
11.8 Literatur	1210
12. Analyse und Regelungen von Schaltnetzteilen	1213
12.1 Regelungskonzepte für Schaltnetzteile	1213
12.2 Übertragungsfunktionen für Schaltnetzteile	1329
12.3 Boost-Konverter – Übertragungsfunktionen (Literaturvergleich) und Regelungen	1373
12.4 Buck-Boost (Flyback-)Konverter – Übertragungsfunktionen sowie (allgemeine) regelungstechnische Konzepte	1437
12.5 Regelung des SEPIC-Konverters mit gekoppelten Spulen	1471
12.6 Regelung von Schaltnetzteilen – Ergänzungen und Beispiele	1503
12.7 Steuer- und Regelschaltungen für Schaltnetzteile (SNTs)	1561
12.8 Neuere Regelungs-ICs für Schaltnetzteile	1583
12.9 Praktische Aspekte – Verbesserung der Kreuzregelung	1601
12.10 Literatur	1615
Anhang 12A. Ergänzungen zu Kapitel 12	2791

Inhalt – Übersicht – Band 2

Wichtige Formelzeichen, Abkürzungen und Symbole	LXV
13. Schaltungen mit über das Gate abschaltbaren Bauelementen	1619
13.1 Gleichstromsteller	1619
13.2 Wechselrichter	1638
13.3 Zusammenfassung	1659
13.4 Literatur	1659
Anhang 13A. Verlustlose Turn-On- und Turn-Off- (Snubber-)Netzwerke	2797
13A.8 Literatur	2834
Anhang 13B. <i>u</i> - <i>Z</i> -Diagramm	2835
14. Optimierung von Netzurückwirkungen und Lastharmonischen	1661
14.1 Allgemeines	1661
14.2 Einphasige netzurückwirkungsarme (Puls-)Gleichrichterschaltungen	1662
14.3 Dreiphasige (Puls-)Gleichrichterschaltungen mit geringen Netzurückwirkungen	1696
14.4 Vienna Rectifier	1708
14.5 Analyse der dreiphasigen AC–DC-Pulsumrichter – Raumzeigerdarstellungen, Grund- und Oberschwingungen	1740
14.6 Sieb- und Gleichrichterschaltungen	1772
14.7 Methoden für die Stromrippelminimierung	1799
14.8 Auswirkung von Welligkeiten auf der Lastseite auf Regelungen	1815
14.9 Literatur	1818
15. Passive Bauelemente und Dimensionierungsbeispiele	1823
15.1 Magnetische Bauteile und Schaltungsdimensionierung	1823
15.2 Skin- und Proximityeffekte in Transformatorwicklungen	1889
15.3 Ferritkerne in Transformatoren von Schaltnetzteilen und Minimierung der Verluste	1913
15.4 Leistungsübertrager und Spulen – Entwurf und Dimensionierung	1924
15.5 Berechnung und Minimierung von Streuinduktivitäten	1950
15.6 Kondensatoren	1963
15.7 Magnetische Materialien und Kondensatoren – Begriffe	1974
15.8 Literatur	2000
Anhang 15A. Übertragbare Transformatorleistung, Faktoren <i>C</i> und <i>K_t</i> sowie Rhombusdiagramm	2003
16. Spezielle Methoden und Anwendungen	2039
16.1 Überblick und typische Beispiele	2039
16.2 Sperrschwingwandler	2069
16.3 Schaltungen für Beleuchtungstechnik und PFC	2092
16.4 Matrixumrichter	2157
16.5 Solarkonverter	2175

16.6 Verstärker	2202
16.7 Netzgekoppelte Pulsumrichter – Aktive Rippelkompensation	2252
16.8 Leistungselektronik im KFZ	2291
16.9 Beeinflussungen der Arbeitsweise	2333
16.10 Literatur	2414
17. Neuere Methoden der elektromagnetischen Verträglichkeit, CE-Kennzeichnung	2423
17.1 Allgemeines	2423
17.2 EMV-Analyse und Störempfindlichkeit (Passive EMV)	2427
17.3 Kopplungsmechanismen	2433
17.4 Störquellen (Aktive EMV)	2445
17.5 Störsignale an der Störsenke (Passive EMV)	2460
17.6 Reduktion von Störungen (der aktiven EMV) und Erhöhung der Störfestigkeit (der passiven EMV)	2470
17.7 EMV-Normung und CE-Kennzeichnung	2504
17.8 Normgerechte Prinzipien zur EMV-Störfestigkeitsmessung	2521
17.9 Normgerechte Prinzipien zur Störaussendungsmessung	2536
17.10 Einteilungsgrundsätze der Störungsarten und praktische Hinweise	2549
17.11 Historische Entwicklung der Funkstörnormen und aktuelle Normwerte	2561
17.12 Beeinflussung von Nachrichtenleitungen durch Schaltungen der Leistungselektronik – Analytische Berechnung	2566
17.13 Literatur	2606
Namen- und Sachverzeichnis	2611
Verzeichnis der Tafeln und Tabellen	2785

Inhaltsverzeichnis Band 1

Wichtige Formelzeichen, Abkürzungen und Symbole	LXV
---	-----

1. Einleitung	1
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
2. Mathematische und elektrotechnische Grundlagen	6
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	Laplace-Transformation	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 überschwingungsbehafteter 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
3.	Bauelemente der Leistungselektronik	73
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 – Freiwerdezeit	102
a)	Spannungsnachlaufzeit t_s	103
b)	Freiwerdezeit t_q	103
3.5.3.3.1	Spannungsnachlaufzeit t_s – Rückstrom i_R	104
3.5.3.3.2	Freiwerdezeit 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
4.	Leistungsteil leistungselektronischer Schaltungen	131
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) Wechselspannungsquelle – 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 Wechselrichters	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 Löschschaltungen	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 Löschschaltungen	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

5.	Steuerung und Betrieb leistungselektronischer Schaltungen (Steuerungskreise, Schaltungen für Antriebe und Regelungen)	395
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 Mittelpunktsschaltungen	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)	Steuerungsumrichter	457

5.9 Transvektorregelung	461
5.10 Weitere Steuerungsarten	462
5.11 Literatur	463
6. Netz- und Lastverhalten leistungselektronischer Schaltungen	465
6.1 Prinzipielles zu den Netzzrückwirkungen	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 Anschnittsteuerung	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 Netzstrom- überschwingungen	503
6.3.2.3 Gleichzeitige Optimierung von Leistungsfaktor und Oberschwingungs- gehalt	505

6.3.3	Kompensationsmethoden (Störungsminde- rung 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 Leistungsfaktoro- ptimierung	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, paral- lel, 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 Saugdros- selschaltung	554
a)	Saugdrosselschaltung	555
b)	Sechspuls-Brückenschaltung mit Y_{y0}	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

7. Funkstörungen (elektromagnetische Beeinflussungen, EMB) und elektromagnetische Verträglichkeit (EMV)	562
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
8. Anwendungen und spezielle Probleme der Leistungselektronik (Ergänzungen und Überblick)	582
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 (Netzzrückwirkungen 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 Stromrichteraskade	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
9. Zeitschriften, Normen und Vorschriften, Konferenzen und Sammelwerke	618
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 Netzrückwirkungen	627
9.5.5 EMV	627
9.5.6 Zusammenfassende und erläuternde Publikationen zu den deutschen (bzw. auch zu internationalen) Vorschriften zur EMV	627
10. Neuere aktive Bauelemente, Ansteuerungen und Beschaltungen	629
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	Synchrone Gleichrichter	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 Halbbrückenzeigen	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, Bauteilsektion	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 3,3 kV-Leistungshalbleiterschaltern	768
10.7.2.2	Ausfallswahrscheinlichkeit	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_{DL1}	788
2. Einschalten und zweite Verzögerung T_{DL2}	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 Snubernetzwerke	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 Optimiertes 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 nd -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
11. Strukturen der Schaltnetzteile	921
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 Schaltnetztes	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 ausgangsseitigen 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 $U_{Norm} = f_{1Norm}(I_{Norm}, D)$ 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 ($U_{Norm} = f_{1Norm}(I_{Norm}, D)$ 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 $U_{Norm} = f_{1Norm}(I_{Norm}, D)$	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	u - Z_i -Diagramm für den quasiresonanten SEPIC(-Konverter) mit ZVS-Technik	1045
11.3.5	Zeta-Konverter mit harter Schalttechnik	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	u - Z_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 Ausschaltung des Hauptschalters (pseudoresonantes ZVS)	1094
11.5.3.3	Hochsetzsteller mit pseudoresonantem ZVS (praktisch verlustlosem Einschalten) und verlustarmer Ausschaltung von Haupt- und Hilfsschalter	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 Kuppeleffekt	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

12. Analyse und Regelungen von Schaltnetzteilen 1213

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-	
tem Stromregelkreis	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)	
für nichtlückenden Betrieb	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	Eingangstromregelung (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 Eingangsstromes (beim Buck-Boost-Konverter, Anwendung für PFC)	1445
12.4.3	Regler	1447
12.4.3.1	PT ₁ -Regler („Typ 1“)	1447
12.4.3.2	PD ₂ T ₃ -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 Bezeichnungsweise	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 ₁ -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_1 -Regler)	1536
c) Regler mit zwei Pol- und zwei bzw. drei Nullstellen (PD_2T_2 - bzw. PD_2T_3 -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 Betragsanschniegung – 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 Impulsdiagramm 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
13. Schaltungen mit über das Gate abschaltbaren Bauelementen	1619
13.1 Gleichstromsteller	1619
13.1.1 MGD/GTO-Gleichstromsteller – Allgemeines	1619
13.1.2 Beschaltungen 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 $C_{R2} \parallel C_{L2}$ zur Energierückspeisung in den DC-Zwischenkreis	2822
13A.7.2 Ableitung von Gl. (13A.2), Energielieferung an $C_{R1} \parallel C_{L1}$ beim Ausschalten von T_1 ohne Berücksichtigung von C_{A1} und D_{A1}	2825
13A.7.3 Ableitung von Gl. (13A.3), Energielieferung an $C_{R1} \parallel C_{L1}$ beim Ausschalten von T_1 unter Berücksichtigung von C_{A1} und D_{A1}	2828
13A.7.4 Details zu Abb. 13A.8	2833
13A.8 Literatur	2834
Anhang 13B. <i>u</i> - <i>Zi</i> -Diagramm	2835

14. Optimierung von Netzzrückwirkungen und Lastharmonischen	1661
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 ₂)	1685
b) Multiplizierer zum Berechnen des Stromsollwertes aufgrund der folgenden gemessenen Werte	1686
c) Stromregler (mit OPV ₁)	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 Dreineivausysteme	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
15. Passive Bauelemente und Dimensionierungsbeispiele	1823
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 Skineffekt	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 Energiezwischen-speicherung	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 Ferriterle	1960
15.5.5 Beziehung zwischen Kernparametern, Luftspallängen 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) Keramik-kondensatoren	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 Ober- schwingungsgehalt	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 Transformatorkernelauswahl 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 Kenngrößen	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
16. Spezielle Methoden und Anwendungen	2039
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	Sperrschwingwandler	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 Lade- phase	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 Nieder- druck-Entladungslampen	2093
16.3.4	Ansteuerschaltungen für den Betrieb von Niederdruck-Entladungslampen – All- gemeines	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. Inselssysteme	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 parasi- tärer Elemente	2404
16.10 Literatur	2414
17. Neuere Methoden der elektromagnetischen Verträglichkeit, CE-Kennzeichnung	2423
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) Netzüberschwingungen	2427
f) Netzspannungsschwankungen	2427

17.1.4 Zusammenfassung	2427
17.2 EMV-Analyse und Störfmpfindlichkeit (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 Netzrückwirkungen – 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 transienter 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 (≤ 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 (Fahrdrabt)	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
Namen- und Sachverzeichnis	2611
Verzeichnis der Tafeln und Tabellen	2785