

Inhaltsverzeichnis

Wichtige Formelzeichen, Abkürzungen und Symbole	XIX
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	4
1.6 Aufbau und Organisation des vorliegenden Werkes	4
1.7 Literatur	5
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
2.1.2 Laplacetransformation	49
2.1.3 Geometrische Reihen, exponentielle Verläufe und quadratische Gleichungen	50
2.1.4 Berechnung von Schaltungen der Leistungselektronik auf elektronischen Rechenanlagen	51

2.2 Elektrotechnische Grundlagen	55
2.2.1 Allgemeines	55
2.2.2 Zählpeile für Spannungen und elektromotorische Kräfte	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
D. Leistungsbilanz und Leistungsarten Oberschwingungsbehafteter Ströme und Spannungen	63
2.2.6 Kennwerte bei nichtsinusförmigem Strom und sinusförmiger Spannung; Leistungsfaktor und Verschiebungsfaktor	68
2.3 Literatur	70
3. Bauelemente der Leistungselektronik	73
3.1 Allgemeines	73
3.2 Einführung in die Grundbegriffe der Halbleitertechnik	73
3.3 Diode	74
3.3.1 Statisches Verhalten	75
3.3.2 Dynamisches Verhalten	77
3.3.3 Abhängigkeiten von der Temperatur	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
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 Durchlaßver- luste	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

3.5.3.3	Ausschaltvorgang — Freiwerdezeit	102
3.5.3.3.1	Spannungsnachlaufzeit t_s — Rückstrom	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	120
3.5.8.2	Querfeldemitter	121
3.5.8.3	Shorted Emitter	122
3.5.8.4	pin-Übergänge, Kantenabschrägung	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 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
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	Steuerkennlinien 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 Steuergesetze für $p > 2$	164
4.2.2.2.4	Wechselrichterbetrieb	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- und 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
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
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
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
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
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	299
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	Wechselrichter (Umrichter) mit steuerbarer Zwischenkreisspannung (Spannungswechselrichter)	317
a)	Allgemeines und Phasenfolgelöschung	317
b)	Phasenlöschung	320
4.3.3.3.9	Wechselrichter (Umrichter) mit konstanter Zwischenkreisspannung (Puls-Spannungswechselrichter, Pulswechselrichter)	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
2.	Spannungswechselrichter	329
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
4A.6	Zusammenfassung	355

Anhang 4B. Mindestzeiten bei Löschsaltungen	355
a) Schaltung nach Abb. 4.91	355
b) Schaltung nach Abb. 4.88a	360
c) Schaltung nach Abb. 4.95	364
d) Zusammenfassung	364
Anhang 4C. Graphische Analyse, Betriebskennlinien und Löschkreisstrukturen	365
4C.1 Allgemeines	365
4C.2 u - Z -Diagramm für den Löschkondensator eines Gleichstromstellers	365
4C.3 Aufladevorgang bei selbstgeführten Wechselrichtern	366
4C.4 McMurray-Inverter	366
4C.5 Betriebskennlinien	369
4C.6 Strukturen der Löschsaltungen	371
Anhang 4D. Bemerkungen zu 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 Thyristor- auswahl	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 (Steuerkreise, Schaltungen für Antriebe und Regelungen)	395
5.1 Allgemeines	395
5.2 Steuerungskreise für Phasenanschnitt und 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
5.4.3 Zweiquadrantenbetrieb	412
5.4.4 Umkehrbetrieb (Vierquadrantenbetrieb)	413
a) Allgemeines: Eingriffe im Ankerkreis und im Feldkreis	413
b) Ankerkreisumschaltung	414
c) Kreisstromfreie Ankerstromumkehr	415
d) Kreisstrombehaftete Ankerstromumkehr	417
d1) Umkehrstromrichter mit Mittelpunktschaltungen	417
d2) Umkehrstromrichter mit Brückenschaltungen	422
e) Feldumkehr durch gesteuerte Stromrichter	426
f) Feldkreisumschaltung	427
5.4.5 Zusammenfassung der Steuerungsgesetze	427
5.4.5.1 Vollgesteuerte Schaltungen ohne Freilaufdiode	427
5.4.5.2 Vollgesteuerte Schaltungen mit Freilaufdiode	428
5.4.5.3 Halbgesteuerte Schaltungen	429
5.4.5.4 Zusammenfassung der Steuerkennlinien und Kompoundierung	429
5.5 Steuerungsmethoden für Gleichstromsteller	430
5.6 Steuerungsmethoden für selbstgeführte Wechselrichter im allgemeinen	436
5.6.1 Steuerung der Eingangsgleichspannung	436
5.6.2 Zündensatzsteuerung (Zündwinkelsteuerung, Impulsbreitensteuerung mit im wesentlichen einem Impuls pro Halbschwingung)	436
5.6.3 Impulsbreitensteuerung (mit mehr als einem Impuls 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 Zwischen- kreis	449
5.7.1 Allgemeine Steuerung	449
5.7.2 „Stromrichtermotor“	452
5.8 Direktumrichter und ihre Steuerungen	454
a) Trapezumrichter	454
b) Steuerumrichter	457
5.9 Transvektorregelung	461
5.10 Weitere Steuerungsarten	462
5.11 Literatur	463
6. Netz- und Lastverhalten leistungselektronischer Schaltungen	465
6.1 Prinzipielles zu den Netzrückwirkungen	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 Anschnitt- steuerung	472
f) Flicker	472

g) Statistische Überlegungen	473
6.1.2.2 Nationale Vorschriften	473
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 Netzstroms 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 (Impulspaketsteuerung)	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	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 Netzstromoverschwingungen	503
6.3.2.3 Gleichzeitige Optimierung von Leistungsfaktor und Oberschwingungsgehalt	505
6.3.3 Kompensationsmethoden (Störungsminderung durch Zusatzeinrichtungen außerhalb der leistungselektronischen Schaltung)	505
6.3.3.1 Allgemeines	505
6.3.3.2 Verbesserung des Leistungsfaktors	506
6.3.3.3 Verbesserung des Oberschwingungsverhaltens	507
6.3.3.3.1 Filter (Saugkreise)	507
6.3.3.3.2 Statistische Kompensation von Oberschwingungen	510
6.4 Pulszeitsteuerung zur Oberschwingungsgehalts- und Leistungsfaktoroptimierung	512
6.4.1 Allgemeine Prinzipien	512
6.4.2 Steuerungsgesetze für ohmsche Last	515
6.4.3 Steuerungsgesetze für induktive Last	517
6.5 Filter (Saugkreise, Siebkreise)	519
6.5.1 Allgemeines	519
6.5.2 Filter bei netzgeführten Schaltungen	520
6.5.2.1 Glättung von Lastspannungen	520
a) Glättungsinduktivität	520
b) Allgemeine Filter	523
6.5.2.2 Glättung des Netzstromes	525
6.5.3 Filter für selbstgeführte Schaltungen	525

6.5.3.1	Aufbau und Übertragungsfunktion	525
6.5.3.2	Dimensionierung von L und C	528
6.5.3.3	Das Ott-Filter	530
6.5.3.4	Weitere Methoden zur Verbesserung der Ausgangsspannung	531
6.6	Transformatoren für Stromrichter	531
6.6.1	Allgemeines	531
6.6.2	Einpuls-Mittelpunktschaltung (M1)	536
6.6.3	Zweipuls-Mittelpunktschaltung (M2)	538
6.6.4	Zweipuls-Brückenschaltung (B2)	540
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 (Dreiphasenbrückenschaltung B6)	546
6.6.6.3	Sechspuls-Mittelpunktschaltung (M6)	549
6.6.6.4	Saugdrosselschaltung (Doppel-Dreipuls-Mittelpunktschaltung, parallel, M3.2)	551
6.6.6.4.1	Berechnung der Transformatortypenleistung	551
6.6.6.4.2	Berechnung der Saugdrosseltypenleistung	553
6.6.6.4.3	Sperrspannung	554
6.6.6.5	Vergleichendes Beispiel: Dimensionierung mit Brücken- und Saugdrosselschaltung	554
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)	558
6.7	Literatur	559
7.	Funktstörungen (elektromagnetische Beeinflussungen) 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 0 bis 20 kHz und Gefährdungsspannung	569
7.3.2.1	Praktisches Beispiel	569
7.3.2.2	Geräuschspannung (Stör-, 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 Thyristorregung von Synchrongeneratoren	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
8.18.1 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 Stromrichtererkaskade	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	607
8.22 Literatur	608
Anhang 8A. Neuere Methoden für Spannungssteuerungen und für Stromregelungen	614
9. Zeitschriften, Normen und Vorschriften	618
9.1 Deutsch- und englischsprachige Zeitschriften, in denen regelmäßig leistungselektronische Probleme behandelt werden	618
9.2 Normen und Vorschriften	618
9.2.1 Grundlegende Normen	619
9.2.2 Bauelemente	619
9.2.3 Schaltungstechnik	620
9.2.4 Netzurückwirkungen	621
9.2.5 EMV (elektromagnetische Verträglichkeit)	621
9.2.6 Zusammenfassende und erläuternde Publikationen zu den deutschen (bzw. auch zu internationalen) Vorschriften über EMV	522
Namen- und Sachverzeichnis	625