

Inhalt

Vorwort zur sechsten Auflage	V
1 Einführung.....	1
1.1 Vorbemerkung.....	1
1.2 Stromversorgungen	3
1.3 PFC Power-Factor-Corrector.....	4
1.3.1 Problemstellung	4
1.3.2 Definition des Leistungsfaktors	4
1.3.3 Geltende Norm.....	6
1.3.4 Lösung durch PFC	6
1.3.5 Betriebsarten zur Leistungsfaktorkorrektur.....	7
1.4 Die Ladungspumpe	9
1.4.1 Schaltungsbeispiele.....	9
1.4.2 Wirkungsgrad und Ausgangsleistung einer Ladungspumpe	10
1.5 Idealisierung.....	11
2 Der Abwärtswandler	13
2.1 Der Abwärtswandler mit nicht lückendem Strom	13
2.1.1 Berechnung der Ausgangsspannung	15
2.1.2 Berechnung der Induktivität L	16
2.1.3 Die Grenze für den nicht lückenden Betrieb	16
2.1.4 Die Größe des Ausgangskondensators	17
2.1.5 Analytische Berechnung des Effektivwertes.....	19
2.1.6 Numerische Bestimmung des Effektivwertes	20
2.2 Der Abwärtswandler mit lückendem Strom	22
2.2.1 Der Eingangsstrom.....	23
2.2.2 Der Ausgangsstrom.....	23
2.2.3 Die Ausgangsspannung.....	23
2.2.4 Grenze zum nicht lückenden Betrieb	24
2.2.5 Tastverhältnis in Abhängigkeit des Ausgangsstroms.....	25
2.3 Der Abwärtswandler mit Umschwingkondensator.....	26
2.3.1 Vorbemerkung	26
2.3.2 Schaltung beim Abwärtswandler	27
3 Der Aufwärtswandler.....	29
3.1 Der Aufwärtswandler mit nicht lückendem Strom	29
3.1.1 Berechnung der Ausgangsspannung	30
3.1.2 Der Eingangsstrom.....	31

3.1.3	Berechnung des Ausgangsstromes	32
3.1.4	Berechnung der Induktivität L	32
3.1.5	Die Größe der Ausgangskapazität	33
3.1.6	Die Grenze des nicht lückenden Betriebs.....	33
3.2	Der Aufwärtswandler mit lückendem Strom.....	34
3.2.1	Die Stromverläufe	34
3.2.2	Berechnung der Ausgangsspannung	35
3.2.3	Normierung	35
3.2.4	Die Grenze zum nicht lückenden Betrieb.....	36
3.3	Bidirektionaler Energiefluss	38
4	Der Multi-Parallel-Wandler	41
4.1	Der Einfach-Synchronwandler	41
4.1.1	Das Schaltbild	41
4.1.2	Die Stromverläufe	42
4.1.3	Berechnung der Stromeffektivwerte	42
4.2	Der Zweifach-Synchronwandler	45
4.2.1	Das Schaltbild	45
4.2.2	Die Stromverläufe	45
4.2.3	Berechnung der Effektivwerte	46
4.2.4	Die Stromverläufe für $v_T < 0,5$	48
4.3	Vierfach-Synchronwandler	49
4.3.1	Das Schaltbild	49
4.3.2	Die Stromverläufe für $v_T \geq 0,75$	49
4.4	Gegenüberstellung der Ergebnisse	50
4.5	Synchronisation von Mehrfachwandlern.....	52
4.5.1	I-I-Messung.....	53
4.5.2	I-T-Control.....	53
4.5.3	PWM-gesteuert	55
4.6	Vergleich der Synchronisationsverfahren	57
5	Der Inverswandler.....	59
5.1	Der Inverswandler mit nicht lückendem Strom	59
5.1.1	Die Ausgangsspannung	61
5.1.2	Berechnung der Induktivität L	62
5.1.3	Die Grenze für den nicht lückenden Betrieb	63
5.2	Der Inverswandler mit lückendem Strom	64
6	Der Sepic-Wandler	67
6.1	Der Sepic-Wandler mit nicht lückendem Strom.....	67
6.1.1	Berechnung der Ausgangsspannung	67

6.1.2	Die wichtigsten Strom- und Spannungsverläufe	68
6.1.3	Die Stromrippel.....	69
6.1.4	Die Belastung der Bauelemente	69
6.1.5	Die Grenze zum lückenden Betrieb	70
6.2	Der Sepic-Wandler mit Potentialtrennung	70
7 Der Ćuk-Wandler		71
7.1	Der Ćuk-Wandler mit positiver Ausgangsspannung	71
7.1.1	Dimensionierung auf kleine Änderungen der energietragenden Größen	71
7.1.2	Dimensionierung auf Resonanz von C_S/L_2	71
7.1.3	Strombelastung von L_2	74
7.1.4	Strombelastung von C_S	74
7.1.5	Dimensionierung von C_S und L_2	75
7.1.6	Dimensionierung der Dioden und T_1	75
7.1.7	Zusammenfassung der Eigenschaften des Ćuk-Wandlers.....	76
7.2	Ćuk-Wandler mit Potentialtrennung.....	77
7.2.1	Schaltbild	77
7.2.2	Beziehungen.....	77
7.3	Dimensionierung als PFC-Wandler.....	80
7.3.1	Vorbemerkung	80
7.3.2	Daten des Wandlers	80
7.3.3	Festlegung von \ddot{u}	80
7.3.4	Dimensionierung des Trafos	81
7.3.5	Verluste des Trafos	81
7.3.6	Dimensionierung der Spulen.....	81
7.3.7	Verluste	82
7.3.8	Dimensionierung weiterer Bauteile.....	82
8 Der Sperrwandler		83
8.1	Der Sperrwandler mit nicht lückendem Strom	83
8.1.1	Die Ausgangsspannung	84
8.1.2	Berechnung der Induktivität L	85
8.1.3	Die Grenze für den nicht lückenden Betrieb	86
8.2	Der Sperrwandler mit lückendem Strom	87
8.2.1	Berechnung der Ausgangskennlinien.....	88
8.3	Beispiel: Sperrwandler mit zwei Ausgangsspannungen.....	91
8.4	Dimensionierungsbeispiel	92
8.4.1	Die quantitativen Strom- und Spannungsverläufe.....	92
8.4.2	Berechnung der Effektivwerte	93
8.4.3	Dimensionierung des Trafos	94
8.4.4	Gegenüberstellung der Verluste	96

9 Der Eintaktflusswandler	97
9.1 Der Eintaktflusswandler mit nicht lückendem Strom.....	97
9.1.1 Die Ausgangsspannung.....	98
9.1.2 Die Primärseite.....	99
9.1.3 Die Induktivität L	100
9.1.4 Grenze des nicht lückenden Betriebs	101
9.2 Der Eintaktflusswandler mit lückendem Strom.....	102
9.2.1 Die Strom- und Spannungsverläufe	102
9.2.2 Normierte Ausgangsgrößen	103
9.2.3 Die Grenze des lückenden Betriebs	104
9.2.4 Die Ausgangsdiagramme	104
9.3 Praktische Ausführung der Primärbrücke.....	106
10 Gegentaktflusswandler.....	107
10.1 Die Standardtopologie.....	107
10.1.2 Schaltung und Kurvenverläufe.....	107
10.1.3 Die Ausgangsspannung.....	108
10.1.4 Ansteuerung des Gegentaktwandlers	109
10.2 Brücken	112
10.2.1 Primärseite	112
10.2.2 Sekundärseite	113
10.3 Dimensionierungsbeispiel für die Standardtopologie.....	114
10.4 Der asymmetrische Halbbrückenwandler.....	118
10.4.1 Schaltung und Kurvenverläufe.....	118
10.4.2 Die Ausgangsspannung.....	119
10.4.3 Der Trafostrom.....	120
11 Der Gegentaktwandler mit Current Doubler am Ausgang	121
11.1 Schaltung und Kurvenverläufe.....	121
11.2 Berechnung der Strombelastungen der Leistungsbauteile.....	123
11.2.1 Ströme durch D_1 und D_2	123
11.2.2 Arithmetischer Mittelwert $\overline{i_{D1}}$	124
11.2.3 Effektivwert I_{D1}	124
11.2.4 Verlustleistung in D_1	128
11.2.5 Strom durch die Sekundärwicklung I_S	128
11.2.6 Strom durch die Primärwicklung I_P	128
11.2.7 Strom durch T_2 und T_4	128
11.2.8 Strom durch T_1 und T_3	128
11.2.9 Strom durch die Ausgangsdrosseln.....	128
11.3 Die CD-Topologie mit Synchronleichrichter am Ausgang	129
11.4 Zero Voltage Switching.....	130
11.4.1 Ausschalten von T_1	130
11.4.2 Ausschalten von T_2	130

12 Blindleistungskonverter	131
12.1 Vorbemerkung.....	131
12.2 Funktionsprinzip.....	131
12.3 Schaltung zur Realisierung.....	132
12.3.2 Strommessung.....	132
12.3.3 Nachregeln der Spannung U_{ZK}	133
12.3.4 Stromverläufe.....	134
13 Resonanzwandler.....	135
13.1 Die Boucherot-Schaltung	135
13.1.1 Beziehungen.....	135
13.1.2 Ansteuerung mit Rechteckspannung.....	138
13.1.3 Berechnung der dritten Oberwelle	139
13.1.4 Realisierung der Rechteckspannung	140
13.1.5 Ein Ausführungsbeispiel: 12V-Vorschaltgerät für Energiesparlampe	140
13.2 Gegentaktwandler mit Umschwingen des Drosselstroms	142
13.2.1 Grundschialtung.....	142
13.2.2 Ausgangsspannung in Abhängigkeit der Schaltzeiten	143
13.2.3 Ausgangskennlinie.....	144
13.2.4 Periodendauer in Abhängigkeit der Ausgangsspannung	145
13.2.5 Umschwingbedingung.....	146
13.3 Resonanzwandler mit variabler Frequenz	148
13.3.1 Schaltung.....	148
13.3.2 Vereinfachte Schaltung.....	148
13.3.3 Ersatzschaltung zur Betrachtung von einem Schaltvorgang	149
13.3.4 Spannungs- und Stromverläufe	149
13.3.5 Beziehungen.....	150
13.3.6 Berechnung der Ausgangsspannung	151
13.4 Vergleich „hartes“ Schalten – Umschwingen.....	152
13.4.1 Beispielschaltung	152
13.4.2 Beziehungen.....	152
13.4.3 Auswirkung auf die ohmschen Verluste in der Drossel	155
14 Leistungsschalter	157
14.1 Der MOSFET	157
14.1.1 Das Schaltzeichen des MOSFET	157
14.1.2 Die Body-Diode.....	157
14.1.3 Das Ersatzschaltbild des MOSFET	159
14.1.4 Einschaltvorgang.....	159
14.1.5 Ausschaltvorgang.....	160
14.1.6 Die Gate-Ladung des MOSFET	160
14.1.7 Die Avalanche-festigkeit.....	161
14.2 Der SenseFET	162
14.3 Der TOPFET	164
14.4 Der IGBT	165

14.4.1	Das Schaltzeichen des IGBTs	165
14.4.2	Das Ersatzschaltbild des IGBTs.....	165
14.4.3	Schaltverhalten.....	166
14.5	Weitere Leistungsschalter	166
14.5.1	Silizium Carbid (SiC).....	166
14.5.2	GaN Transistoren	167
14.6	Schaltverluste	169
14.6.1	Abschaltvorgang mit ohmscher Last.....	169
14.6.2	Abschaltvorgang mit induktiver Last.....	170
14.6.3	Abschaltvorgang ohne Schaltverluste	171
14.7	Verbesserte Freilaufdiode.....	173
14.8	Verpolschutzdiode (Kfz)	174
14.9	Sperrverzugszeit von Dioden	175
14.9.1	Problemstellung	175
14.9.2	Messschaltung	175
14.9.3	Auswirkung auf den Schaltvorgang	176
14.9.4	Abhilfe	177
15	Treiberschaltungen für MOSFETs und IGBTs.....	179
15.1	Einfache Treiberschaltungen.....	179
15.1.1	Ansteuerung mit CMOS-Gattern	180
15.1.2	Treiber mit Push-Pull-Stufe	180
15.1.3	Aktives Abschaltnetzwerk am Gate	181
15.1.4	Treiber-ICs.....	182
15.2	Treiberschaltungen mit Potentialtrennung.....	183
15.2.1	Treiberschaltung mit einstellbaren Schaltzeiten.....	183
15.2.2	Treiber mit Impulsübertrager	184
15.2.3	Primärseitige Treiber für den Impulsübertrager.....	188
15.2.4	Differenzier- und Multiplexlogik	189
15.2.5	Dimensionierung des Impulsübertragers	191
15.2.6	Sekundärseitige Treiberschaltung	192
15.2.7	Ansteuerung mit verzögertem Einschalten.....	194
15.3	Treiberschaltungen für DC-Motoren.....	196
15.3.1	High-Side-Schalter mit Ladungspumpe	196
15.4	DC-Motoren	199
15.4.1	Ersatzschaltbild eines DC-Motors.....	199
15.4.2	Belastungskurven	199
15.4.3	Drehzahlvorsteuerung	200
16	Regelung der Wandler	201
16.1	PWM-Erzeugung.....	201
16.2	Regelung der Ausgangsspannung.....	202
16.3	Analoger PI-Regler	203
16.3.1	PI-Regler mit OP-Schaltung	203
16.3.2	Passiver PI-Regler.....	204

16.4 Einsatz von integrierten Schaltkreisen	205
16.5 Verwendung von Mikrocontrollern.....	207
16.5.1 DA-Wandler.....	207
16.5.2 Programmierter PWM-Generator.....	210
16.6 Programmierung eines PI-Reglers.....	215
17 Magnetische Bauteile.....	217
17.1 Grundlagen des magnetischen Kreises	217
17.1.1 Die Luftspule.....	217
17.1.2 Der magnetische Kreis mit Ferrit.....	219
17.2 Dimensionierung von Spulen	224
17.2.1 Vorbemerkung	224
17.2.2 Aussteuerung des magnetischen Kreises.....	225
17.2.3 Bestimmung des A_L -Wertes	225
17.2.4 Ersatzschaltbild der realen Spule	226
17.2.5 Ortskurve der Spule	227
17.2.6 Kupferverluste in der Wicklung.....	227
17.2.7 Verlustwinkel und Güte	228
17.3 Der Transformator.....	229
17.3.1 Allgemeine Beziehungen für sinusförmige Verläufe	229
17.3.2 Das Streuersatzschaltbild des Trafos.....	231
17.3.3 Dimensionierung des Trafos	234
17.4 Dimensionierung von Wicklungen.....	236
17.4.1 Die Primärwicklung.....	236
17.4.2 Skin-Effekt.....	237
17.4.3 Folienwicklung.....	239
17.4.4 Der Wicklungsaufbau.....	240
17.4.5 Luftstrecken und Überschlagsfestigkeit	241
17.4.6 Streufelder.....	241
17.5 Stromspitzen bei Transformatoren	243
17.5.1 Auswirkung der Magnetisierungskurve	243
17.5.2 Normalbetrieb	244
17.5.3 Ausfall von Netzhalbwellen.....	244
17.5.4 Einschalten eines Netztrafos im Nulldurchgang der Spannung	244
17.6 Der Stromwandler	245
17.6.1 Anwendungsbereich.....	245
17.6.2 Die Schaltung.....	245
17.6.3 Ein Ausführungsbeispiel	246
17.6.4 Stromwandler mit Gleichrichter.....	246
17.6.5 Stromwandler in Schaltschränken.....	246
18 Kondensatoren und Filter.....	247
18.1 Grundsätzliches	247
18.2 Elektrolytkondensatoren.....	248

18.2.1 Verlustfaktor von Elektrolytkondensatoren	248
18.2.2 Resonanzfrequenz von Elektrolytkondensatoren	249
18.2.3 Wechselstrombelastbarkeit von Elektrolytkondensatoren.....	249
18.3 Folienkondensatoren	252
18.4 CLC-Filter	254
18.4.1 Schaltung.....	254
18.4.2 Zahlenbeispiel für ein CLC-Filter	255
19 Strommessung.....	257
19.1 Einführung.....	257
19.2 Strommessverfahren.....	258
19.2.1 Strommessung mit Shunt	258
19.2.2 Der Stromwandler.....	258
19.2.3 Der direktabbildender Stromwandler	259
19.2.4 Der Kompensationsstromwandler	259
19.2.5 Der Eta Stromwandler.....	260
19.2.6 Rogowsky Spule	260
19.2.7 Magnetische Widerstände	260
19.3 Stromwandler	261
19.3.1 Funktionsprinzip	261
19.3.2 Einfluss der realen Trafoeigenschaften	262
19.3.3 Schaltungsbeispiel.....	263
19.4 Shunt	264
19.4.1 Widerstand oder R_{DSon}	264
19.4.2 Grenzen des Messprinzips.....	265
19.5 Isolierschaltungen.....	267
19.5.1 Problemstellung	267
19.5.2 Induktive Hilfsspannungserzeugung.....	267
19.5.3 Kapazitive Hilfsspannungsversorgung.....	269
19.5.4 Spannungs-Frequenzwandler	269
19.5.5 Trennverstärker	269
19.5.6 Level Shifting mit Stromquelle.....	270
19.6 Stromerfassung für PFC-Wandler	271
19.6.1 Aufgabenstellung	271
19.6.2 Der Nullstromdetektor	271
19.6.3 Berechnung von t_{aus}	272
20 Die Kopplungsarten.....	273
20.1 Allgemeines.....	273
20.1.1 Verkopplungen erkennen	274
20.2 Die Widerstandskopplung	276
20.2.1 Prinzip der Widerstandskopplung	276
20.2.2 Abhilfemaßnahmen	277
20.2.3 Beispiele.....	278
20.2.4 Widerstandsberechnung	282
20.3 Die kapazitive Kopplung	284

20.3.1	Prinzip der kapazitiven Kopplung.....	284
20.3.2	Vermeidung und Abhilfemaßnahmen	285
20.3.3	Beispiele.....	286
20.3.4	Einfacher Nachweis elektrischer Felder im Labor	288
20.4	Die magnetische Kopplung	289
20.4.1	Prinzipdarstellung der magnetischen Kopplung.....	289
20.4.2	Abhilfemaßnahmen bei magnetischer Einkopplung	289
20.4.3	Beispiele.....	290
20.4.4	Einfaches Messen von magnetischen Störungen im Labor	292
20.5	Strahlungskopplung.....	293
20.5.1	Allgemeines	293
20.5.2	Prinzip der Strahlungskopplung.....	293
20.5.3	Abhilfemaßnahmen.....	294
20.5.4	Messung am Kraftfahrzeug	295
20.6	Beispiele aus der Leistungselektronik	296
20.6.1	Kommutierungsvorgang an den Leistungsschaltern	296
20.6.2	Ankopplung des Treibers an den Leistungsschalter	296
21	Störquellen	297
21.1	Zeitbereich – Frequenzbereich	297
21.1.1	Bandbreite	297
21.1.2	Störimpfindlichkeit.....	298
21.1.3	Messprinzip.....	298
21.2	Fourierreihen	299
21.3	Der Rechteckimpuls	300
21.4	Der Trapezverlauf	306
21.5	Störungen in einem konventionellen Netzteil.....	309
22	Symmetrie	311
22.1	Prinzip der Symmetrie.....	311
22.2	Wie erreichen wir die Symmetrie?	312
22.3	Definition der Masse	313
22.4	Einfluss von leitenden Flächen.....	315
22.5	Verdrillte Leitungen	316
22.6	Symmetrische Datenübertragung	316
22.6.1	Prinzip.....	316
22.6.2	Eigenschaften	317
22.6.3	Grenzen des Verfahrens	317
22.6.4	Symmetrierung mittels Trafo	318
22.6.5	Beispiele.....	318

23 EMV in der Schaltungstechnik	319
23.1 Bauelemente und Schaltungen unter EMV-Aspekten	319
23.1.1 Widerstände	319
23.1.2 Kondensatoren	319
23.1.3 Induktivitäten	320
23.1.4 Der Operationsverstärker	321
23.1.5 Komparatoren.....	323
23.1.6 Subtrahierverstärker	325
23.1.7 Digitalschaltungen und Prozessoren	327
23.1.8 Die Leiterplatte	328
23.2 Übergang von analog auf digital	330
23.2.1 Schaltzeiten von analogen und von digitalen Schaltkreisen.....	330
23.2.2 Digitalschaltungen mit Schmitttrigger-Verhalten	331
23.2.3 Flipflop als Schnittstelle.....	331
23.2.4 Anschluss an AD-Wandler.....	331
23.3 Überspannungsschutz.....	332
23.3.1 Schutzelemente	332
23.3.2 Prüfschaltung „Blitzeinschlag in unmittelbarer Nähe“	334
23.4 EMV-gerechte Eingangsschaltung	335
23.4.1 Tipps für den Aufbau	335
23.5 Maßnahmen in der Software	336
23.5.1 Nichtbeschaltete Interrupteingänge.....	336
23.5.2 Illegale Op-Codes	336
23.5.3 Watchdogs.....	336
23.5.4 Plausibilitätsabfragen	336
23.5.5 Programme testen.....	337
23.5.6 Wie störfest ist eine Schaltung?	337
23.6 Spezifische EMV-Aspekte bei Schaltreglern	338
23.6.1 Der Synchronabwärtswandler als Beispiel.....	338
23.6.2 Eingangs- und Ausgangsfilter	338
23.6.3 Masseverdrahtung	339
23.6.4 Anschluss der Treiber	340
23.6.5 Messen der Ausgangsspannung	340
23.6.6 Aufgespannte Fläche.....	340
 Literaturverzeichnis.....	 341
 Sachwortverzeichnis.....	 343