

# Elektronik und Mikroelektronik

Grundlagen

Hansjörg Diethelm  
Jürg Heiniger

Herausgegeben von jürg Kurt



**Fortis FH**

Bildung Sauerländer  
in Verlagsgemeinschaft mit  
BOHMANN BUCHVERLAG MANZ Fortis Verlag FH  
Aarau/Bern - Wien - Köln

# Inhaltsverzeichnis

Vorwort . . . . .	12
-------------------	----

## Teil I: Halbleiterphysik und -bauelemente

<b>1</b>	<b>REPETITION ELEKTROTECHNIK . . . . .</b>	<b>13</b>
1.1	Ladung . . . . .	13
1.2	Elektrisches Feld. . . . .	14
1.3	Ladungsdichte und Feldstärke. . . . .	15
1.4	Spannung, Potenzial und Energie . . . . .	16
1.5	Kapazität . . . . .	19
1.6	Strom und Ohmsches Gesetz. . . . .	20
<b>2</b>	<b>ATOMHÜLLE . . . . .</b>	<b>23</b>
2.1	Bohrsches Modell. . . . .	25
2.2	Modell-Erweiterungen. . . . .	27
2.3	Weitere Aspekte. . . . .	28
2.4	Periodisches System der Elemente. . . . .	28
<b>3</b>	<b>FESTKÖRPER . . . . .</b>	<b>31</b>
3.1	Aufbau. . . . .	31
3.2	Bindungsarten. . . . .	31
3.3	Bändermodell. . . . .	32
3.4	Metall, Isolator und Halbleiter im Bändermodell . . . . .	36
<b>4</b>	<b>HALBLEITER . . . . .</b>	<b>38</b>
4.1	Eigenleitung. . . . .	38
4.2	Fremdleitung. . . . .	43
<b>5</b>	<b>pn-ÜBERGANG. . . . .</b>	<b>47</b>
5.1	Diffusionsspannung. . . . .	48
5.2	Bändermodell des pn-Übergangs. . . . .	49
5.3	Sperr- und Durchlassrichtung des pn-Übergangs. . . . .	50
<b>6</b>	<b>DIODEN. . . . .</b>	<b>57</b>
6.1	Eigenschaften von pn-Dioden. . . . .	57
6.1.1	Gleichstromverhalten, Shockley-Gleichung. . . . .	57
6.1.2	Temperaturverhalten. . . . .	58
6.1.3	Transientes Verhalten. . . . .	61
6.2	Modellierung der Diodenkennlinie. . . . .	63
6.2.1	Ideale Diode. . . . .	63
6.2.2	Stückweise lineare Modelle. . . . .	63
6.2.3	Nichtlineares Modell. . . . .	64
6.2.4	Diodenmodell für CAD-Anwendungen. . . . .	65
6.3	Dioden mit besonderen Eigenschaften. . . . .	67
6.3.1	Zenerdiode. . . . .	67
6.3.2	Stückweise lineares Modell einer Zenerdiode. . . . .	70

6.3.3	Schottky-Diode . . . . .	71
6.3.4	PIN-Diode . . . . .	71
6.3.5	Kapazitätsdiode . . . . .	71
6.3.6	Leuchtdiode (LED) . . . . .	72
<b>7</b>	<b>BIPOLARE TRANSISTOREN</b> . . . . .	<b>73</b>
<b>7.1</b>	<b>Aufbau und Wirkungsweise von pnp- und npn-Transistoren</b> . . . . .	<b>73</b>
<b>7.2</b>	<b>Grundschaltungen des Transistors</b> . . . . .	<b>76</b>
<b>7.3</b>	<b>Kennlinienfelder und Kennwerte</b> . . . . .	<b>77</b>
7.3.1	Eingangs-Kennlinienfeld . . . . .	77
7.3.2	Ausgangs-Kennlinienfeld . . . . .	78
7.3.3	Steuer-Kennlinienfeld . . . . .	80
7.3.4	Rückwirkungs-Kennlinienfeld . . . . .	83
7.3.5	Vierquadranten-Kennlinienfeld . . . . .	83
7.3.6	Datenblätter und weitere Kennwerte . . . . .	84
<b>7.4</b>	<b>Modellierung des Bipolartransistors</b> . . . . .	<b>86</b>
7.4.1	Grosssignalmodell nach Ebers-Moll . . . . .	87
7.4.2	Linearisiertes Grosssignalmodell . . . . .	90
7.4.3	Linearisiertes Kleinsignalmodell . . . . .	91
7.4.4	Kleinsignalmodell nach Giacoletto . . . . .	93
7.4.5	h-Parameter . . . . .	94
7.4.6	Transistormodell für CAD-Anwendungen . . . . .	97
<b>8</b>	<b>FELDEFFEKT-TRANSISTOREN (Unipolare Transistoren)</b> . . . . .	<b>100</b>
<b>8.1</b>	<b>Übersicht über die FET-Typen</b> . . . . .	<b>100</b>
<b>8.2</b>	<b>Sperrschicht-FET (JFET)</b> . . . . .	<b>101</b>
8.2.1	Aufbau und Wirkungsweise . . . . .	101
8.2.2	Ausgangs-Kennlinienfeld . . . . .	103
8.2.3	Steuer-Kennlinienfeld . . . . .	104
8.2.4	Temperaturverhalten . . . . .	105
8.2.5	Grosssignalmodell . . . . .	106
8.2.6	Kleinsignalmodell . . . . .	107
<b>8.3</b>	<b>Isolierschicht-FET (MOSFET)</b> . . . . .	<b>107</b>
8.3.1	Aufbau und Wirkungsweise . . . . .	108
8.3.2	Kennlinien . . . . .	110
8.3.3	Temperaturverhalten . . . . .	111
8.3.4	Grosssignalmodell . . . . .	112
8.3.5	Kleinsignalmodell . . . . .	112

## Teil II: Analoge Schaltungstechnik

<b>9</b>	<b>SCHALTUNGEN MIT DIODEN</b> . . . . .	<b>113</b>
<b>9.1</b>	<b>Gleichrichter</b> . . . . .	<b>113</b>
9.1.1	Einweggleichrichter . . . . .	113
9.1.2	Einweggleichrichter mit Speicherkondensator . . . . .	115
9.1.3	Vollweggleichrichter . . . . .	116

9.2	<b>Begrenzer</b> . . . . .	118
9.3	<b>Schalter</b> . . . . .	120
9.4	<b>Entkoppler</b> . . . . .	121
9.5	<b>Spannungsvervielfacher</b> . . . . .	122
9.5.1	Delon-Schaltung . . . . .	123
9.5.2	Villard-Schaltung . . . . .	123
9.5.3	Greinacher-Schaltung . . . . .	124
9.6	<b>Spannungstabilisierung mit Zenerdiode</b> . . . . .	125
9.6.1	Vorwiderstand . . . . .	126
9.6.2	Glättungsfaktor . . . . .	127
<b>10</b>	<b>VERSTÄRKER MIT BIPOLAREN TRANSISTOREN (EMITTERSCHALTUNG)</b> _____	129
10.1	<b>Ausgangs-Kennlinienfeld und Arbeitsgerade</b> . . . . .	129
10.2	<b>Einstellung des Arbeitspunktes</b> . . . . .	130
10.3	<b>Betriebsgrößen ohne Arbeitspunkt-Stabilisierung</b> . . . . .	133
10.3.1	Verhalten bei sehr tiefen Frequenzen . . . . .	136
10.3.2	Verhalten bei sehr hohen Frequenzen . . . . .	139
10.3.3	Frequenzgang . . . . .	141
10.4	<b>Arbeitspunkt-Stabilisierung</b> . . . . .	142
10.4.1	Gleichstromgegenkopplung . . . . .	145
10.4.2	Gleichspannungsgegenkopplung . . . . .	148
10.5	<b>Gegenkopplung</b> . . . . .	149
10.6	<b>Betriebsgrößen bei Arbeitspunkt-Stabilisierung und Wechselstromgegenkopplung</b> . . . . .	151
10.6.1	Frequenzgang . . . . .	154
10.7	<b>Betriebsgrößen bei Arbeitspunkt-Stabilisierung ohne Wechselstromgegenkopplung</b> . . . . .	155
10.7.1	Frequenzgang . . . . .	156
<b>11</b>	<b>AUSGANGSSTUFEN MIT BIPOLAREN TRANSISTOREN</b> . . . . .	159
11.1	<b>Kollektorschaltung (Emitterfolger)</b> . . . . .	159
11.2	<b>Gegentaktverstärker (komplementärer Emitterfolger)</b> . . . . .	161
<b>12</b>	<b>STROMQUELLEN MIT BIPOLAREN TRANSISTOREN</b> . . . . .	166
<b>13</b>	<b>SPANNUNGSQUELLEN MIT BIPOLAREN TRANSISTOREN</b> . . . . .	168
<b>14</b>	<b>VERBUNDSCHALTUNGEN MIT BIPOLAREN TRANSISTOREN</b> . . . . .	170
14.1	<b>Darlington-Schaltung</b> . . . . .	170
14.2	<b>Stromspiegel-Schaltung</b> . . . . .	171
<b>15</b>	<b>SCHALTER MIT BIPOLAREN TRANSISTOREN</b>	174
15.1	<b>Schaltverhalten eines idealen Schalters</b> . . . . .	174

15.2	<b>Statisches Schaltverhalten des Transistors</b> . . . . .	174
15.3	<b>Dynamisches Schaltverhalten des Transistors</b> . . . . .	176
15.3.1	Einschaltverhalten . . . . .	177
15.3.2	Ausschaltverhalten . . . . .	177
15.4	<b>Ansteuerschaltungen</b> . . . . .	178
16	<b>VERSTÄRKER MIT FELDEFFEKT- TRANSISTOREN (SOURCE-SCHALTUNG)</b> _____	181
16.1	<b>Ausgangs-Kennlinienfeld und Arbeitsgerade</b> . . . . .	181
16.2	<b>Einstellung des Arbeitspunktes</b> . . . . .	182
16.3	<b>FET-Grundsaltungen</b> . . . . .	184
16.4	<b>Betriebsgrößen der Source-Schaltung</b> . . . . .	184
17	<b>STELLWIDERSTAND MIT FELDEFFEKT- TRANSISTOREN</b> . . . . .	186
18	<b>STROMQUELLEN MIT FELDEFFEKT- TRANSISTOREN</b> . . . . .	187
19	<b>KASKADIERUNG VON VERSTÄRKERSTUFEN</b>	189
20	<b>DIFFERENZVERSTÄRKER</b> . . . . .	191
20.1	<b>Funktionsweise eines FET-Differenzverstärkers</b> . . . . .	191
20.2	<b>Kleinsignalanalyse eines FET-Differenzverstärkers</b> . . . . .	192
21	<b>OPERATIONSVERSTÄRKER (OP)</b> . . . . .	194
21.1	<b>Einführung</b> . . . . .	194
21.2	<b>Aufbau eines OPs</b> . . . . .	195
21.3	<b>Kenngrößen des idealen OPs</b> . . . . .	196
21.3.1	Die <goldenen> Regeln für die Behandlung gegengekoppelter OP-Schaltungen . . . . .	197
21.4	<b>Der ideale OP als Spannungsverstärker</b> . . . . .	197
21.4.1	Nichtinvertierender Verstärker . . . . .	198
21.4.2	Invertierender Verstärker . . . . .	199
21.5	<b>Kenngrößen und Grenzwerte realer OPs</b> . . . . .	201
21.5.1	Eingangsruhestrom $I_o$ (Input Bias Current) . . . . .	201
21.5.2	Eingangsoffset-Strom $I_{OS}$ (Input Offset Current) . . . . .	203
21.5.3	Eingangsoffset-Stromdrift $\Delta I_{OQ}/\Delta T$ (Input Offset Current Drift) . . . . .	203
21.5.4	Eingangsoffset-Spannung $U_{OS}$ (Input Offset Voltage) . . . . .	203
21.5.5	Eingangsoffset-Spannungsdrift $\Delta U_{OS}/\Delta T$ (Input Offset Voltage Drift) . . . . .	205
21.5.6	Gleichtaktspannungs-Verstärkung $V_G$ (Common Mode Gain) . . . . .	205
21.5.7	Gleichtaktspannungs-Unterdrückung $G$ (CMRR, Common Mode Rejection Ratio) . . . . .	206
21.5.8	Differenz-Eingangsspannungsbereich (Differential Input Voltage Range) . . . . .	207

21.5.9	Maximale Ausgangsspannung $U_{\text{amax}}$ (Output Voltage Swing) . . . . .	207
21.5.10	Maximaler Ausgangsstrom (Maximum Output Current) . . . . .	207
21.5.11	Bandbreite, Grenzfrequenz $f_{\text{gb}}$ (Open-Loop Bandwidth, Cut-Off Frequency). . . . .	207
21.5.12	Transitfrequenz $f_j$ (Unity Gain Frequency). . . . .	208
21.5.13	Max. Änderungsgeschwindigkeit der Ausgangsspannung $S$ (Slew Rate). . . . .	208
21.5.14	Anstiegszeit $t_r$ (Rise Time). . . . .	209
21.5.15	Erholzeit $t_s$ (Recovery Time). . . . .	209
<b>21.6</b>	<b>Einfluss der Kenngrößen eines realen OPs auf einen invertierenden Verstärker. . . . .</b>	<b>210</b>

### Teil III Digitaltechnik

<b>22</b>	<b>EINFÜHRUNG IN DIE DIGITALTECHNIK. . . . .</b>	<b>213</b>
<b>22.1</b>	<b>Analoge und digitale Signale. . . . .</b>	<b>213</b>
<b>22.2</b>	<b>Binärsystem, binäre Codierung. . . . .</b>	<b>214</b>
<b>22.3</b>	<b>Darstellung digitaler Signale. . . . .</b>	<b>216</b>
22.3.1	Die Ziffern im Binärsystem. . . . .	216
22.3.2	Informationseinheiten. . . . .	217
22.3.3	Paralleldarstellung. . . . .	218
22.3.4	Serielle Darstellung. . . . .	218
<b>22.4</b>	<b>Stärken der Digitaltechnik. . . . .</b>	<b>219</b>
22.4.1	Stör-Unempfindlichkeit, Genauigkeit. . . . .	219
22.4.2	Verwendbarkeit ungenauer Komponenten. . . . .	219
22.4.3	Möglichkeiten der Fehlerkorrektur. . . . .	219
22.4.4	Integrierte Schaltungen in der Digitaltechnik. . . . .	219
<b>22.5</b>	<b>Typische Aufgaben der Digitaltechnik. . . . .</b>	<b>220</b>
<b>23</b>	<b>RECHNEN IM BINÄRSYSTEM. . . . .</b>	<b>221</b>
<b>23.1</b>	<b>Zahlendarstellung. . . . .</b>	<b>221</b>
<b>23.2</b>	<b>Arithmetische Operationen mit Dualzahlen. . . . .</b>	<b>222</b>
23.2.1	Addition. . . . .	223
23.2.2	Subtraktion. . . . .	223
23.2.3	Multiplikation. . . . .	223
23.2.4	Division. . . . .	224
<b>23.3</b>	<b>Umrechnen von Zahlen in verschiedene Zahlensysteme. . . . .</b>	<b>224</b>
23.3.1	Ganzzahliger Anteil. . . . .	224
23.3.2	Echt gebrochener Anteil. . . . .	225
23.3.3	Zusammenfassung. . . . .	228
<b>23.4</b>	<b>Addition und Subtraktion im Digitalrechner. . . . .</b>	<b>228</b>
23.4.1	Allgemeines. . . . .	228
23.4.2	Positive, binärcodierte Zahlen. . . . .	229

23.4.3	Vorzeichenbehaftete Zahlen . . . . .	229
23.4.3.1	Rechnen mit Zweierkomplementen . . . . .	230
23.4.3.2	Rechnen mit Einerkomplementen . . . . .	233
23.4.4	Rechnen mit Dezimalzahlen in binärer Darstellung . . . . .	235
23.4.5	Interpretation von 8-Bit-Zahlen . . . . .	237
23.4.6	Ergänzende Bemerkungen . . . . .	237
23.4.6.1	Bereichserweiterung . . . . .	237
23.4.6.2	Multiplikation, Division . . . . .	237
<b>24</b>	<b>KOMBINATORISCHE SCHALTUNGEN</b>	<b>238</b>
<b>24.1</b>	<b>Allgemeines</b> . . . . .	<b>238</b>
<b>24.2</b>	<b>Boolesche Funktionen</b> . . . . .	<b>239</b>
24.2.1	Definition . . . . .	239
24.2.2	Funktionstabelle . . . . .	239
24.2.3	Anzahl der möglichen booleschen Funktionen. . . . .	240
24.2.4	Boolesche Funktionen mit einer Variablen . . . . .	241
24.2.5	Boolesche Funktionen mit zwei Variablen . . . . .	243
24.2.6	Symbolik für Verknüpfungen . . . . .	246
24.2.7	Priorität der Verknüpfungszeichen . . . . .	246
24.2.8	Boolesche Funktionen von mehreren Variablen. . . . .	247
24.2.8.1	Definitionen . . . . .	247
24.2.8.2	Normalformen einer Funktion . . . . .	248
24.2.8.3	Schaltungsrealisierung . . . . .	250
24.2.9	Theoreme von De Morgan . . . . .	250
24.2.10	Dualität . . . . .	252
<b>25</b>	<b>REALISIERUNG DIGITALER INTEGRIERTER SCHALTKREISE</b> . . . . .	<b>254</b>
<b>25.1</b>	<b>Allgemeines</b> . . . . .	<b>254</b>
25.1.1	Verknüpfungsglieder mit Dioden . . . . .	254
25.1.2	Verknüpfungsglieder mit Transistoren . . . . .	255
<b>25.2</b>	<b>Der bipolare Transistor als Schalter</b> . . . . .	<b>255</b>
25.2.1	Funktionsweise . . . . .	255
25.2.2	Schaltvorgänge und Schaltzeiten . . . . .	257
25.2.2.1	Schalten in den Durchlasszustand . . . . .	257
25.2.2.2	Schalten in den Sperrzustand . . . . .	258
25.2.3	Verlustleistung einer Transistorschaltstufe . . . . .	259
<b>25.3</b>	<b>Der Feldeffekt-Transistor als Schalter</b> . . . . .	<b>260</b>
25.3.1	Funktionsweise . . . . .	260
<b>25.4</b>	<b>Schaltungseigenschaften</b> . . . . .	<b>261</b>
25.4.1	Leistungsaufnahme . . . . .	261
25.4.2	Übertragungs-Kennlinie . . . . .	262
25.4.3	Schaltzeiten . . . . .	262
25.4.4	Zusammenschalten von Bausteinen . . . . .	264

<b>26</b>	<b>ANALYSE UND SYNTHESE VON KOMBINATORISCHEN SCHALTUNGEN . .</b>	<b>266</b>
<b>26.1</b>	<b>Schaltungsanalyse</b> . . . . .	266
<b>26.2</b>	<b>Schalt-Algebra</b> . . . . .	267
26.2.1	Grundgesetze . . . . .	267
26.2.2	Theoreme (abgeleitet aus den Grundgesetzen). .	268
26.2.3	Kommutativ-Gesetz . . . . .	268
26.2.4	Assoziativ-Gesetz . . . . .	268
26.2.5	Distributiv-Gesetz . . . . .	269
26.2.6	Entwicklungssätze . . . . .	269
<b>26.3</b>	<b>Synthesen von kombinatorischen Schaltungen durch Anwendung der schalt-algebraischen Gesetze</b> . . . . .	270
26.3.1	Reduktion benachbarter Terme . . . . .	271
26.3.2	Absorptionsgesetze . . . . .	271
26.3.3	Vereinfachung durch Anwendung des Distributiv- Gesetzes (Reduktion benachbarter Terme) . . . .	272
<b>26.4</b>	<b>Vereinfachung durch das Karnaugh-Diagramm.</b>	273
26.4.1	Minterm-Methode . . . . .	273
26.4.2	Beispiele . . . . .	277
26.4.3	KV-Tafeln für mehr als vier Variablen . . . . .	278
26.4.4	Maxterm-Methode . . . . .	279
26.4.5	Berücksichtigung frei wählbarer Terme . . . . .	280
<b>26.5</b>	<b>Vereinfachung nach Quine-McCluskey.</b>	281
26.5.1	Minterm-Methode . . . . .	282
26.5.2	Maxterm Methode . . . . .	284
26.5.3	Frei wählbare Terme . . . . .	284
<b>26.6</b>	<b>Einige weitere Aspekte zu den kombinatorischen Schaltungen</b> . . . . .	284
26.6.1	Mehrfachausnutzung von Gattern . . . . .	284
26.6.2	Herausheben gemeinsamer Faktoren aus booleschen Ausdrücken . . . . .	286
26.6.3	Positive Logik - Negative Logik . . . . .	287
26.6.4	Statische und dynamische Fehlverhalten bei kombinatorischen Schaltungen . . . . .	288
26.6.4.1	Statische Hazards . . . . .	289
26.6.4.2	Dynamischer Hazard . . . . .	290
26.6.4.3	Vermeidung bzw. Beseitigung von Hazards....	292
26.6.4.4	Funktionelle Hazards . . . . .	292
<b>26.7</b>	<b>Komplexe Bausteine der kombinatorischen Logik</b> . . . . .	293
<b>27</b>	<b>CODIERUNG</b> . . . . .	<b>294</b>
<b>27.1</b>	<b>Grundbegriffe</b> . . . . .	294
<b>27.2</b>	<b>Code-Eigenschaften</b> . . . . .	295
27.2.1	Additive Codes . . . . .	295
27.2.2	Einschrittige Codes . . . . .	295
27.2.3	Minimale Codes . . . . .	296
27.2.4	Optimale Codes . . . . .	296



27.2.5	Redundante Codes	297
<b>27.3</b>	<b>Codes im Binär-Zahlensystem</b>	297
27.3.1	Natürlicher Binärcode	297
27.3.2	Gray-Code (reflektierter Binärcode)	298
27.3.3	Johnson-Code	298
<b>27.4</b>	<b>Codes im BDC-Zahlensystem</b>	299
27.4.1	Code	300
27.4.2	Überschuss-3-Code (Excess-3-Code, Stibitz-Code)	300
27.4.3	Code (Aiken-Code)	301
27.4.4	Glixon-Code (einschrittiger dekadischer Code)	302
<b>27.5</b>	<b>Alphanumerische Codes</b>	303
27.5.1	CCITT Alphabet Nr. 2	303
27.5.2	ASCII-Code	304
27.5.3	Erweiterter ASCII-Zeichensatz	306
<b>27.6</b>	<b>Fehlererkennende und -korrigierende Codes</b>	306
27.6.1	Allgemeines	306
27.6.2	Fehlererkennende, nicht lineare Codes	309
27.6.2.1	Zwei-aus-fünf-Codes	309
27.6.2.2	Drei-aus-fünf-Codes	309
27.6.3	Fehlererkennende, lineare Codes	310
27.6.4	Fehlerkorrigierende, lineare Codes	311
27.6.4.1	Hamming-Distanz	311
27.6.4.2	Hamming-Code (HD=3)	314
27.6.5	Redundanz - mathematisch	319
<b>28</b>	<b>SEQUENZIELLE SCHALTUNGEN</b>	<b>320</b>
<b>28.1</b>	<b>Allgemeines</b>	320
<b>28.2</b>	<b>Struktur der sequenziellen Schaltungen</b>	320
<b>28.3</b>	<b>Speicherelemente</b>	321
28.3.1	Übersicht	321
28.3.2	Nicht taktgesteuerte Flip-Flops	322
28.3.3	Taktzustandsgesteuerte Flip-Flops	325
28.3.4	Taktflankengesteuerte Flip-Flops	327
28.3.4.1	Einflankengesteuerte Flip-Flops	327
28.3.4.2	Zweiflankengesteuertes Flip-Flop	329
28.3.5	Flankengesteuerte FF als reale Schaltelemente	330
28.3.6	Synchrone sequenzielle Schaltungen	334
28.3.7	Allgemeines	334
28.3.8	Beschreibung synchroner sequenzieller Schaltungen	335
28.3.9	Synthese von synchronen sequenziellen Schaltungen ohne Eingangsleitungen	336
28.3.9.1	Problemstellung	336
28.3.9.2	Verwendung von D-FF als Speicherelemente	337
28.3.9.3	Verwendung von JK-FF als Speicherelemente	339
28.3.9.4	Synthese, wenn die Anzahl der Zustände nicht einer ganzzahligen Potenz von 2 entspricht	346

28.3.10	Synthese von synchronen sequenziellen Schaltungen mit Eingangssignalen . . . . .	349
28.3.11	Komplexe synchrone sequenzielle Schaltungen . . . . .	353
<b>28.4</b>	<b>Asynchrone sequenzielle Schaltungen</b> . . . . .	<b>354</b>
28.4.1	Allgemeines. . . . .	354
28.4.2	Asynchrone Zähler. . . . .	355
28.4.3	Synthese von Vorwärts- und Rückwärtszählern. . . . .	357
28.4.4	Vergleich zwischen synchronen und asynchronen Zählern . . . . .	360
<b>28.5</b>	<b>Als IC erhältliche Bausteine für sequenzielle Schaltungen</b> . . . . .	<b>360</b>
28.5.1	Zähler. . . . .	360
<b>29</b>	<b>DIE DIGITALEN SCHALTKREISFAMILIEN.</b> . . . .	<b>362</b>
<b>29.1</b>	<b>Allgemeines.</b> . . . .	<b>362</b>
<b>29.2</b>	<b>Bipolare Schaltkreise.</b> . . . .	<b>362</b>
29.2.1	DTL-Schaltungen . . . . .	362
29.2.2	TTL-Schaltungen . . . . .	365
29.2.2.1	Allgemeines. . . . .	365
29.2.2.2	Aufbau der Standard-TTL-Schaltungen. . . . .	366
29.2.2.3	Eigenschaften von Standard-TTL-Schaltungen . . . . .	369
29.2.2.4	Schottky TTL . . . . .	375
29.2.2.5	Advanced Schottky TTL . . . . .	378
29.2.2.6	Vergleich der TTL-Schaltkreise. . . . .	379
29.2.3	ECL-Schaltungen. . . . .	380
<b>29.3</b>	<b>MOS-Schaltungen.</b> . . . .	<b>382</b>
29.3.1	Allgemeines. . . . .	382
29.3.2	NMOS. . . . .	383
29.3.3	CMOS. . . . .	384
29.3.3.1	CMOS-4000-Familie. . . . .	387
29.3.3.2	HCMOS. . . . .	389
29.3.3.3	Schutz gegen statische Aufladungen. . . . .	389
29.3.3.4	Latch-Up. . . . .	389
	Literaturverzeichnis. . . . .	391