

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

1	REPETITION ELEKTROTECHNIK	13
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
2	ATOMHÜLLE	23
2.1	Bohrsches Modell.	25
2.2	Modell-Erweiterungen.	27
2.3	Weitere Aspekte.	28
2.4	Periodisches System der Elemente.	28
3	FESTKÖRPER	31
3.1	Aufbau.	31
3.2	Bindungsarten.	31
3.3	Bändermodell.	32
3.4	Metall, Isolator und Halbleiter im Bändermodell	36
4	HALBLEITER	38
4.1	Eigenleitung.	38
4.2	Fremdleitung.	43
5	pn-ÜBERGANG.	47
5.1	Diffusionsspannung.	48
5.2	Bändermodell des pn-Übergangs.	49
5.3	Sperr- und Durchlassrichtung des pn-Übergangs.	50
6	DIODEN.	57
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
7	BIPOLARE TRANSISTOREN	73
7.1	Aufbau und Wirkungsweise von pnp- und npn-Transistoren	73
7.2	Grundschaltungen des Transistors	76
7.3	Kennlinienfelder und Kennwerte	77
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
7.4	Modellierung des Bipolartransistors	86
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
8	FELDEFFEKT-TRANSISTOREN (Unipolare Transistoren)	100
8.1	Übersicht über die FET-Typen	100
8.2	Sperrschicht-FET (JFET)	101
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
8.3	Isolierschicht-FET (MOSFET)	107
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

9	SCHALTUNGEN MIT DIODEN	113
9.1	Gleichrichter	113
9.1.1	Einweggleichrichter	113
9.1.2	Einweggleichrichter mit Speicherkondensator	115
9.1.3	Vollweggleichrichter	116

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

15.2	Statisches Schaltverhalten des Transistors	174
15.3	Dynamisches Schaltverhalten des Transistors	176
15.3.1	Einschaltverhalten	177
15.3.2	Ausschaltverhalten	177
15.4	Ansteuerschaltungen	178
16	VERSTÄRKER MIT FELDEFFEKT- TRANSISTOREN (SOURCE-SCHALTUNG) _____	181
16.1	Ausgangs-Kennlinienfeld und Arbeitsgerade	181
16.2	Einstellung des Arbeitspunktes	182
16.3	FET-Grundsaltungen	184
16.4	Betriebsgrößen der Source-Schaltung	184
17	STELLWIDERSTAND MIT FELDEFFEKT- TRANSISTOREN	186
18	STROMQUELLEN MIT FELDEFFEKT- TRANSISTOREN	187
19	KASKADIERUNG VON VERSTÄRKERSTUFEN	189
20	DIFFERENZVERSTÄRKER	191
20.1	Funktionsweise eines FET-Differenzverstärkers	191
20.2	Kleinsignalanalyse eines FET-Differenzverstärkers	192
21	OPERATIONSVERSTÄRKER (OP)	194
21.1	Einführung	194
21.2	Aufbau eines OPs	195
21.3	Kenngrößen des idealen OPs	196
21.3.1	Die <goldenen> Regeln für die Behandlung gegengekoppelter OP-Schaltungen	197
21.4	Der ideale OP als Spannungsverstärker	197
21.4.1	Nichtinvertierender Verstärker	198
21.4.2	Invertierender Verstärker	199
21.5	Kenngrößen und Grenzwerte realer OPs	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 $\Delta I_{OS}/\Delta T$ (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_{amax} (Output Voltage Swing)	207
21.5.10	Maximaler Ausgangsstrom (Maximum Output Current)	207
21.5.11	Bandbreite, Grenzfrequenz f_{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
21.6	Einfluss der Kenngrößen eines realen OPs auf einen invertierenden Verstärker.	210

Teil III Digitaltechnik

22	EINFÜHRUNG IN DIE DIGITALTECHNIK.	213
22.1	Analoge und digitale Signale.	213
22.2	Binärsystem, binäre Codierung.	214
22.3	Darstellung digitaler Signale.	216
22.3.1	Die Ziffern im Binärsystem	216
22.3.2	Informationseinheiten	217
22.3.3	Paralleldarstellung	218
22.3.4	Serielle Darstellung	218
22.4	Stärken der Digitaltechnik.	219
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
22.5	Typische Aufgaben der Digitaltechnik.	220
23	RECHNEN IM BINÄRSYSTEM.	221
23.1	Zahlendarstellung.	221
23.2	Arithmetische Operationen mit Dualzahlen.	222
23.2.1	Addition	223
23.2.2	Subtraktion	223
23.2.3	Multiplikation	223
23.2.4	Division	224
23.3	Umrechnen von Zahlen in verschiedene Zahlensysteme.	224
23.3.1	Ganzzahliger Anteil	224
23.3.2	Echt gebrochener Anteil.	225
23.3.3	Zusammenfassung	228
23.4	Addition und Subtraktion im Digitalrechner.	228
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
24	KOMBINATORISCHE SCHALTUNGEN	238
24.1	Allgemeines	238
24.2	Boolesche Funktionen	239
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
25	REALISIERUNG DIGITALER INTEGRIERTER SCHALTKREISE	254
25.1	Allgemeines	254
25.1.1	Verknüpfungsglieder mit Dioden	254
25.1.2	Verknüpfungsglieder mit Transistoren	255
25.2	Der bipolare Transistor als Schalter	255
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
25.3	Der Feldeffekt-Transistor als Schalter	260
25.3.1	Funktionsweise	260
25.4	Schaltungseigenschaften	261
25.4.1	Leistungsaufnahme	261
25.4.2	Übertragungs-Kennlinie	262
25.4.3	Schaltzeiten	262
25.4.4	Zusammenschalten von Bausteinen	264

26	ANALYSE UND SYNTHESE VON KOMBINATORISCHEN SCHALTUNGEN . .	266
26.1	Schaltungsanalyse	266
26.2	Schalt-Algebra	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
26.3	Synthesen von kombinatorischen Schaltungen durch Anwendung der schalt-algebraischen Gesetze	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
26.4	Vereinfachung durch das Karnaugh-Diagramm.	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
26.5	Vereinfachung nach Quine-McCluskey	281
26.5.1	Minterm-Methode	282
26.5.2	Maxterm Methode	284
26.5.3	Frei wählbare Terme	284
26.6	Einige weitere Aspekte zu den kombinatorischen Schaltungen	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
26.7	Komplexe Bausteine der kombinatorischen Logik	293
27	CODIERUNG	294
27.1	Grundbegriffe	294
27.2	Code-Eigenschaften	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
27.3	Codes im Binär-Zahlensystem	297
27.3.1	Natürlicher Binärcode	297
27.3.2	Gray-Code (reflektierter Binärcode)	298
27.3.3	Johnson-Code	298
27.4	Codes im BDC-Zahlensystem	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
27.5	Alphanumerische Codes	303
27.5.1	CCITT Alphabet Nr. 2	303
27.5.2	ASCII-Code	304
27.5.3	Erweiterter ASCII-Zeichensatz	306
27.6	Fehlererkennende und -korrigierende Codes	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
28	SEQUENZIELLE SCHALTUNGEN	320
28.1	Allgemeines	320
28.2	Struktur der sequenziellen Schaltungen	320
28.3	Speicherelemente	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
28.4	Asynchrone sequenzielle Schaltungen	354
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
28.5	Als IC erhältliche Bausteine für sequenzielle Schaltungen	360
28.5.1	Zähler.	360
29	DIE DIGITALEN SCHALTKREISFAMILIEN.	362
29.1	Allgemeines.	362
29.2	Bipolare Schaltkreise.	362
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
29.3	MOS-Schaltungen.	382
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