
Grundlagen elektronischer Schaltungen

von
Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Hilberg
Technische Hochschule Darmstadt

2., verbesserte Auflage

Mit 361 Bildern

R. Oldenbourg Verlag München Wien 1992

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	11
1.0 Allgemeine Grundlagen	13
1.1 Die unterschiedlichen Abstraktionsebenen	13
1.2 Beschreibungsmöglichkeiten	18
1.3 Keine Superposition bei nichtlinearen Schaltungen	23
1.4 Impulse und Übergangsfunktionen	27
1.5 Impulse und ihr Spektrum	30
1.6 Die Unschärferelation der Informationstechnik	39
1.7 Schaltvorgänge in linearen passiven Schaltungen	43
1.7.1 Grundsaltungen mit nur einem Energiespeicher	44
1.7.2 Das Differenzierglied	46
1.7.3 Das Integrierglied	50
1.7.4 Kompensierter Spannungsteiler	52
1.8 Leistung und Energie in nichtlinearen Schaltungen	56
1.8.1 Maximale Leistungsübertragung von einem nichtlinearen Generator zu einem nichtlinearen Verbraucher	56
1.8.2 Nichtlineare Energiespeicher	62
2.0 Schaltungen mit nichtlinearen Zweipolen	71
2.1 Der allgemeine nichtlineare Zweipol	71
2.2 Die pn-Diode	72
2.3 Berechnung von Schaltvorgängen in Diodenschaltungen	80
2.3.1 Diode, Widerstand und Spannungssprung	80
2.3.2 Diode, Kapazität und Spannungssprung	81
2.3.3 Diode, Kapazität und Stromsprung	85
2.4 Das Arbeiten mit statischen Kennlinien	88
2.4.1 Definition von Kennlinien	88
2.5 Stückweise lineare Kennlinien	96
2.5.1 Problemstellung und elementare, geknickte Kennlinien	96

2.5.2	Synthese von Schaltungen mit Dioden (Kennlinienapproximation mit technisch idealen Dioden)	99
2.5.3	Analyse von Schaltungen mit Dioden (Kennlinienkonstruktion von Schaltungen mit technisch idealen Dioden)	100
2.6	Die Analyse von Diodengattern	103
2.6.1	Dioden-UND-Gatter	103
2.6.2	Dioden-ODER-Gatter	108
2.6.3	Die Hintereinanderschaltung von UND- und ODER-Schaltungen ...	111
2.7	Dynamisches Verhalten von pn-Dioden	113
2.7.1	Durchlaßbereich	113
2.7.2	Das Sperren von Dioden	116
3.0	Schaltungen mit bipolaren Transistoren	119
3.1	Allgemeine Beschreibung	119
3.2	Die Grundgleichungen von Ebers und Moll	123
3.3	Das Injektionsersatzschaltbild	129
3.4	Die physikalisch richtige Stromrichtung	132
3.5	Kennlinien des bipolaren Transistors	133
3.6	Weitere Ersatzschaltbilder	145
3.7	Genaue Berechnung einfacher Schaltungen	147
3.8	Temperaturabhängigkeit der Transistorgrößen	154
3.9	Häufige Vereinfachungen und Ergänzungen im Transistor-Ersatzschaltbild ..	158
3.9.1	Vereinfachungen und Erweiterungen	158
3.9.2	Ergänzungen	162
3.10	Der Transistor als Schalter	164
3.10.1	Relais und Transistor	164
3.10.2	Der Transistor mit ohmscher Last	166
3.10.3	Der Transistor mit kapazitiver Last	168
3.10.4	Der Transistor mit induktiver Last	172
3.10.5	Kapazitive Ansteuerung eines Transistors	175
3.11	Gatter mit Transistoren	179
3.11.1	Der Inverter	179
3.11.2	Die ideale SpÜK für logische Schaltkreise	185
3.11.3	NULL- und EINS-Bereiche bei invertierenden Gattern	188

3.11.4	Schaltkreisfamilien (Transistor-Gatter mit mehreren Eingängen)	193
3.12	Thyristor (Vierschichtdiode)	207
3.13	Die Analyse dynamischer Vorgänge in bipolaren Transistoren mit dem Ladungssteuerungsmodell	213
3.13.1	Rechenansatz der Ladungssteuerungstheorie	213
3.13.2	Anwendungsbeispiele	215
3.13.3	Verhalten im übersteuerten Zustand (Sättigung)	219
3.13.4	Ersatzbilddarstellung	224
3.13.5	Kleinsignalverhalten	231
3.13.6	Betrachtungen über die Konstanz der Großsignalparameter	235
4.0	Schaltungen mit Feldeffekttransistoren (MOSFET)	237
4.1	Anfänge der Technik	237
4.2	Prinzip des MOSFET	239
4.2.1	Widerstandsbereich	239
4.2.2	Abschnürbereich	245
4.2.3	Steuer-Kennlinie	246
4.2.4	Komplementäre Transistoren	247
4.2.5	Spannungsgesteuerter Widerstand	248
4.2.6	Endliche Steigung im Abschnürbereich	249
4.2.7	Schwellspannung und Substratvorspannung	251
4.2.8	Vollständiges Großsignal-Ersatzschaltbild	253
4.2.8.1	Die Problemstellung	253
4.2.8.2	Symmetrische Darstellung der Transistor-Gleichungen	256
4.2.8.3	Vollständiges Ersatzschaltbild mit antiparallelen Stromquellen	257
4.3	Der MOSFET-Inverter	259
4.3.1	Das statische Verhalten eines Inverters	259
4.3.2	Das dynamische Kleinsignal-Verhalten eines MOSFET	263
4.3.3	Inverter mit ohmscher und kapazitiver Last	266
4.3.4	Inverter mit Transistor- und Kapazitätslast	268
4.3.5	Inverter mit Anreicherungs- und Verarmungstransistoren	271
4.4	MOSFET-Gatter	272
4.4.1	Statische NAND- und NOR-Schaltungen	272

4.4.2	Dynamische Inverter und Gatter	273
4.4.3	Gatter mit komplementären MOS-FETs (CMOS-Technik)	275
4.4.4	Leistung und Schaltzeit bei CMOS	282
5.0	Elementare Digitalschaltungen	285
5.1	Die symmetrische bistabile Kippschaltung (Flip-Flop)	285
5.1.1	Bestimmung der Schleifenverstärkung V	285
5.1.2	Schleifenverstärkung und Sättigungsbedingung des Flip-Flops	288
5.1.3	Asynchrones RS-Flipflop	291
5.1.4	Synchrones RS-Flipflop	293
5.1.5	D-Flipflop	294
5.1.6	T-Flipflop	294
5.1.7	JK-Flipflop	296
5.1.8	Master-Slave-Flipflop	297
5.1.9	Triggervorgang und SpÜK	298
5.2	Die symmetrische astabile Kippschaltung	299
5.3	Monostabile Kippschaltung	305
5.4	Die unsymmetrische bistabile Kippschaltung (Schmitt-Schaltung)	307
5.5	Sägezahngenerator	309
5.5.1	Prinzip	309
5.5.2	Miller-Generator	309
5.5.3	Bootstrapgenerator	311
6.	Elementare Analogschaltungen	313
6.1	Der Operationsverstärker	314
6.1.1	Die idealen Eigenschaften	314
6.1.2	Die Schaltung	315
6.1.3	Die realen Eigenschaften	316
6.2	Elementare Schaltungen mit dem Operationsverstärker	318
6.2.1	Invertierender Verstärker	318
6.2.2	Addierer mit Vorzeichenumkehr	319
6.2.3	Nichtinvertierender Widerstandsverstärker	320
6.2.4	Addierer ohne Vorzeichenumkehr	321
6.2.5	Spannungs-Strom-Wandler	323

6.2.6	Strom-Spannungs-Wandler	324
6.2.7	Differenzverstärker	324
6.3	Analoger Integrator	327
6.3.1	Eigenschaften der Schaltung	327
6.3.2	Der Analogrechner	331
6.4	Aktive Filter (RC-Filter)	333
6.4.1	Tiefpässe	333
6.4.2	Transformationen	337
6.4.3	Aktives Resonanzkreis-Bandfilter	339
6.5	Präzisionsgleichrichter	343
6.5.1	Die Präzisionsdiode	343
6.5.2	Der Begrenzer	344
6.5.3	Schneller Einweg-Gleichrichter (AM-Demodulator)	344
6.5.4	Schneller Zweiweg-Gleichrichter (Betragsbildung)	345
6.5.5	Der Spitzen-Detektor	347
6.6	Schaltungen zur Abtastung	348
6.6.1	Abtast- und Halteschaltungen	348
6.6.2	Lineares Dioden-Tor	349
6.6.3	Lineares Transistor-Tor	352
6.6.4	Multiplexer und Demultiplexer	353
6.7	Impedanz-Vorzeichen-Wandler	354
6.8	Logarithmischer und exponentieller Verstärker	356
6.8.1	Grundschialtung	356
6.8.2	Anwendung beim analogen Multiplizieren	357
6.9	D/A- und A/D-Wandler	358
6.10	Der Komparator	361
6.10.1	Grundschialtung	361
6.10.2	Rechteckwellen	363
6.10.3	Regeneriervverstärker (Schmitt-Schaltung)	365
6.10.4	Rechteckwellen-Generator	367
6.10.5	Zweiphasenverstärker	368
6.11	Modulation und Demodulation	369
6.11.1	Modulationsarten	369
6.11.2	AM mit Zweiphasenverstärker	370

6.11.3	AM mit Zerhacker	372
6.12	Oszillatoren	373
6.12.1	Die elementare Theorie	373
6.12.2	Der Phasenverschiebungs-Oszillator	376
6.12.3	Prinzip des Hartley- und Colpitts-Oszillators	378
6.12.4	Der Wien-Brücke-Oszillator	380
6.12.5	Der Quarz-Oszillator	381
6.13	Zur Feinstruktur des Operationsverstärkers	384
Anhang		395
Literaturhinweise		397
Stichwortverzeichnis		405