

---

# **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

<b>Vorwort .....</b>	<b>11</b>
<b>1.0 Allgemeine Grundlagen .....</b>	<b>13</b>
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 Grundschaltungen 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
<b>2.0 Schaltungen mit nichtlinearen Zweipolen .....</b>	<b>71</b>
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
<b>3.0</b>	<b>Schaltungen mit bipolaren Transistoren .....</b>	<b>119</b>
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 Feldeffektransistoren (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 Kapazitätlast .....	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
<b>5.0</b>	<b>Elementare Digitalschaltungen .....</b>	<b>285</b>
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 bistable Kippschaltung (Schmitt-Schaltung) .....	307
5.5	Sägezahngenerator .....	309
5.5.1	Prinzip .....	309
5.5.2	Miller-Generator .....	309
5.5.3	Bootstrapgenerator .....	311
<b>6.</b>	<b>Elementare Analogschaltungen .....</b>	<b>313</b>
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	Tiefpassse .....	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	Grundschaltung .....	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	Grundschaltung .....	361
6.10.2	Rechteckwellen .....	363
6.10.3	Regenerierverstärker (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
<b>Anhang</b>	.....	<b>395</b>
<b>Literaturhinweise</b>	.....	<b>397</b>
<b>Stichwortverzeichnis</b>	.....	<b>405</b>