

Ch. Weddigen, W. Jüngst

# Elektronik

Eine Einführung  
für Naturwissenschaftler und Ingenieure  
mit Beispielen zur Computer-Simulation

Zweite, neu bearbeitete und erweiterte Auflage

Mit 274 Abbildungen



Springer-Verlag  
Berlin Heidelberg New York  
London Paris Tokyo  
Hong Kong Barcelona Budapest

# Inhalt

Einleitung .....	1
1. Lineare Netzwerkelemente .....	3
1.1 Der Widerstand .....	4
1.2 Die Spannungsquelle .....	6
1.3 Die Stromquelle .....	8
1.4 Die Kapazität .....	9
1.5 Die Induktivität .....	11
1.6 Das Koaxialkabel .....	12
1.6.1 Das ideale Koaxialkabel .....	13
1.6.2 Abschlußwiderstand und Reflexionen .....	14
1.6.3 Angepaßte Signalabschwächung und -verteilung .....	16
1.6.4 Das reale Koaxialkabel .....	17
1.6.5 Das Verzögerungskabel .....	18
1.E DO IT YOURSELF .....	19
2. Das Wechselstromverhalten von RCL-Schaltungen .....	23
2.1 Die komplexe Beschreibung des Wechselstromverhaltens linearer Netzwerke .....	23
2.2 Serienschaltungen von R und C (Hoch- und Tiefpaß) .....	26
2.3 Schwingkreise .....	27
2.4 Kettenschaltung dreier RC-Glieder .....	29
2.5 Der frequenzkompensierte Spannungsteiler .....	30
2.6 Eine iterative Filterkette als Verzögerungsleitung .....	31
2.7 Ein Verfahren zur Messung von Impedanzen .....	33
2.E DO IT YOURSELF .....	35
3. Analyse linearer Netzwerke .....	40
3.1 Die Maschenanalyse .....	40
3.2 Die Knotenanalyse .....	44
3.3 Das Überlagerungstheorem .....	46
3.4 Der Satz von der Zweipolquelle (Das Theorem von Thévenin) .....	46
3.5 Der Satz von der Ersatzstromquelle (Das Theorem von Norton) .....	47

3.6 Analyse eines DAC-Leiternetzwerkes .....	48
3.E DO IT YOURSELF .....	49
4. Das Impulsverhalten von RCL-Schaltungen .....	52
4.1 Die RL-Serienschaltung .....	53
4.2 Die RC-Serienschaltung .....	55
4.2.1 Das Differenzierglied .....	56
4.2.2 Das Integrierglied .....	58
4.3 RCL-Schaltungen .....	59
4.3.1 Die RCL-Serienschaltung .....	59
4.3.2 Die RCL-Parallelschaltung .....	63
4.4 Zwei weitere RC-Netzwerke .....	64
4.4.1 Das Integrier-Differenzierglied .....	64
4.4.2 Das Doppeldifferenzierglied .....	65
4.5 Antwortfunktionen für beliebige Eingangsimpulse .....	67
4.E DO IT YOURSELF .....	68
5. Dioden und Diodenschaltungen .....	72
5.1 Die Flächendiode .....	72
5.1.1 Kennlinie und Schaltverhalten .....	72
5.1.2 Linearisierte Ersatzschaltungen .....	74
5.2 Spezialdioden .....	75
5.2.1 Die Zener-Diode .....	75
5.2.2 Die Tunnel- und die Backward-Diode .....	76
5.2.3 Kapazitäts- und Schottky-Dioden .....	78
5.2.4 Foto- und Luminiszenzdioden .....	78
5.3 Einige Diodenschaltungen .....	79
5.3.1 Die Vollweggleichrichtung .....	79
5.3.2 Die Kaskadenschaltung .....	80
5.3.3 Die Zener-Diode als Spannungsquelle .....	84
5.3.4 Eine Klammerschaltung mit Zener-Dioden .....	84
5.3.5 Kippschaltungen mit Tunneldioden .....	85
5.E DO IT YOURSELF .....	87
6. Transistoren und Eintransistororschaltungen .....	91
6.1 Der bipolare Transistor .....	91
6.1.1 Kennlinien und Kenngrößen .....	92
6.1.2 Linearisierte Ersatzschaltungen .....	94
6.1.3 Der Transistor als Schalter .....	96
6.2 Transistororschaltungen .....	97
6.2.1 Kenngrößen von Transistororschaltungen .....	97

6.2.2 Der Entwurf einer Transistorschaltung .....	98
6.2.3 Beispiel 1: Der Emitterfolger .....	98
6.2.4 Beispiel 2: Der stromgegengekoppelte Verstärker .....	101
6.2.5 Serienschaltung von Verstärker und Emitterfolger .....	103
6.3 Die Transistorgrundschaltungen .....	104
6.3.1 Die formale Berechnung der Kenngrößen .....	104
6.3.2 Die Kollektorgrundschaltung (Emitterfolger) .....	105
6.3.3 Die Basisgrundschaltung .....	106
6.3.4 Die Emittergrundschaltung .....	107
6.4 Zwei weitere Eintransistorschaltungen .....	109
6.4.1 Der stromgegengekoppelte Verstärker .....	109
6.4.2 Der spannungsgegengekoppelte Verstärker .....	110
6.5 Eintransistorschaltungen (Zusammenfassung) .....	111
6.E DO IT YOURSELF .....	112
 7. Weitere Transistorschaltungen .....	117
7.1 Rückkopplung .....	117
7.1.1 Mitkopplung: $G > 0$ .....	117
7.1.2 Gegenkopplung: $G < 0$ .....	118
7.2 Der Begriff der virtuellen Masse .....	121
7.3 Kippschaltungen mit zwei Transistoren .....	121
7.3.1 Das RS-Flipflop .....	121
7.3.2 Der Univibrator .....	122
7.3.3 Der Multivibrator .....	122
7.4 Impedanzwandler .....	124
7.4.1 Der Whitesche Emitterfolger .....	125
7.4.2 Darlington-Schaltungen und Spannungsfolger .....	126
7.4.3 Impedanzwandler mit Bootstrap .....	127
7.5 Schaltungen mit 'long-tailed pairs' .....	127
7.5.1 Das lineare Tor .....	128
7.5.2 Der Differenzverstärker .....	128
7.6 Schnelle Schaltungen (Miller-Effekt) .....	130
7.6.1 Differenzverstärker mit einem Eingang .....	131
7.6.2 Die Kaskodenschaltung .....	131
7.7 Stromspiegel .....	131
7.E DO IT YOURSELF .....	132
 8. Feldeffekttransistoren (FETs) .....	138
8.1 Der JFET .....	139
8.2 Der MOSFET .....	141
8.3 Linearisierte Ersatzschaltung für FETs .....	143

8.4 Einige typische FET-Schaltungen .....	144
8.4.1 Sourcefolger .....	144
8.4.2 Kaskoden-Differenzverstärker .....	145
8.4.3 Variable Widerstände .....	146
8.4.4 Lineare Schalter .....	147
8.E DO IT YOURSELF .....	148
 9. Der integrierte Operationsverstärker und seine Grundschaltungen .....	154
9.1 Der elektronische Aufbau des 741 .....	155
9.2 Kenngrößen und linearisierte Ersatzschaltung des IOP .....	156
9.3 Der IOP in analogen Schaltungen (Goldene Regeln) .....	157
9.4 Berechnung der Grundschaltungen des IOP .....	159
9.4.1 Die invertierende Grundschaltung (Umkehrverstärker, Drift-kompensation) .....	159
9.4.2 Die nichtinvertierende Grundschaltung (Elektrometerverstärker und Spannungsfolger) .....	161
9.5 Das dynamische Verhalten des IOP .....	163
9.5.1 Frequenzgang und Frequenzkompensation .....	163
9.5.2 Anstiegsgeschwindigkeit und interne Verzögerung .....	166
9.6 Übersicht über das Angebot an Operationsverstärkern .....	166
9.E DO IT YOURSELF .....	169
 10. Weitere Schaltungen mit Operationsverstärkern .....	171
10.1 Analoge Rechenoperationen .....	172
10.1.1 Der Rechenverstärker .....	172
10.1.2 Die analoge Subtraktion .....	173
10.2 Schwellenwertdetektoren .....	174
10.2.1 Der Komparator .....	174
10.2.2 Der Schmitt-Trigger mit IOP .....	174
10.3 Generatoren .....	175
10.3.1 Der Phasenschieberoszillator .....	175
10.3.2 Der Rampengenerator (Spannung-Frequenz-Umsetzer) .....	176
10.3.3 Flipflop-Schaltungen mit IOP .....	177
10.4 Ideale Gleichrichter .....	178
10.4.1 Der ideale Halbwelligleichrichter und Spitzenwertdetektor ..	178
10.4.2 Der ideale Vollwelligleichrichter .....	179
10.5 NIC-Schaltungen .....	180
10.5.1 Die Erzeugung negativer Widerstände und Kapazitäten .....	180
10.5.2 Konstantstromquelle mit NIC .....	181
10.5.3 Der Gyrator .....	182

10.6 Aktive Filter .....	184
10.E DO IT YOURSELF .....	186
11. Grundlagen der digitalen Elektronik .....	196
11.1 Grundlagen der Schaltalgebra .....	197
11.1.1 Schaltalgebraische Variable und ihre Standardverknüpfungen ..	197
11.1.2 Normalformen schaltalgebraischer Funktionen .....	199
11.1.3 Gesetze und Regeln der Schaltalgebra .....	201
11.2 Der Entwurf einer digitalen Schaltung .....	203
11.3 Logikfamilien .....	204
11.3.1 DTL-Grundschaltungen .....	205
11.3.2 Die TTL-Grundschaltung .....	205
11.3.3 Die ECL-Grundschaltung .....	206
11.3.4 CMOS-Grundschaltungen .....	207
11.3.5 Vergleich der Logikfamilien .....	208
11.4 Weiteres über TTL-Gatter .....	209
11.4.1 TTL-Baureihen .....	209
11.4.2 NAND- und AND-Gatter, TTL-Schaltverhalten .....	210
11.4.3 NOR-, OR- und EXOR-Gatter .....	212
11.4.4 Inverter, offene Eingänge und spezielle Ausgänge von TTL-Gattern .....	213
11.E DO IT YOURSELF .....	214
12. Digitale Kippschaltungen .....	216
12.1 Grundschaltungen .....	216
12.1.1 Das RS-Flipflop .....	216
12.1.2 Das D-Flipflop .....	217
12.1.3 Der Univibrator und der Multivibrator .....	218
12.2 Klassifizierung digitaler Flipflops .....	218
12.2.1 Klassifizierung nach Ansteuerung .....	219
12.2.2 Klassifizierung nach Wahrheitstabelle .....	220
12.3 Beispiele für Flipfloptypen .....	221
12.3.1 RS-Flipflops .....	221
12.3.2 D-Flipflops .....	222
12.3.3 JK-Flipflops .....	222
12.4 Clock-Generatoren .....	223
12.E DO IT YOURSELF .....	225
13. Weitere digitale Schaltungen .....	228
13.1 Kombinatorische Schaltungen .....	228
13.1.1 Codewandler .....	228

13.1.2 Multiplexer und Demultiplexer .....	229
13.2 Zählerschaltungen .....	230
13.2.1 Asynchrone Binärzähler .....	230
13.2.2 Synchrone Binärzähler .....	231
13.2.3 Untersetzer (Frequenzteiler) .....	232
13.3 Schieberegister .....	233
13.4 Halbleiterspeicher .....	234
13.E DO IT YOURSELF .....	236
 14. Digitale Rechenschaltungen .....	239
14.1 Addierer .....	239
14.1.1 Der Halbaddierer .....	239
14.1.2 Der Volladdierer .....	240
14.1.3 Der 4-Bit-Volladdierer SN7483 .....	240
14.2 Darstellungen von Dualzahlen .....	241
14.2.1 Die natürliche Darstellung $A_{(n)}$ ganzer positiver Zahlen .....	241
14.2.2 Die Standarddarstellung $A_{(n)}$ ganzer Zahlen mit Vorzeichen ...	242
14.2.3 Die n-Bit-Darstellung $A_{(n)}$ ganzer Zahlen mit Vorzeichen .....	242
14.3 Digitale Parallelrechennetze .....	243
14.3.1 Addiernetze .....	243
14.3.2 Subtrahiernetze .....	244
14.3.3 Die parallele Multiplikation .....	245
14.3.4 Die parallele Division .....	246
14.4 Die serielle Multiplikation .....	247
14.E DO IT YOURSELF .....	248
 15. Signalumsetzer .....	251
15.1 Amplitudenumsetzer .....	252
15.1.1 Diskriminatoren .....	252
15.1.2 Diskriminatoren mit verbesserter Zeitauflösung .....	253
15.1.3 Amplitude-Zeit-Umsetzer (ATC) .....	254
15.1.4 Spannung-Frequenz-Umsetzer (VFC, VCO) .....	256
15.2 Umsetzung digitaler Signale .....	256
15.2.1 Digital-Analog-Umsetzer (DAC) .....	256
15.2.2 Funktionsgeneratoren .....	257
15.2.3 Erzeugung eines Zeitintervalls (Timer) .....	257
15.3 Frequenzumwandlung .....	258
15.3.1 Zählratenmesser ('rate meter') .....	258
15.3.2 Weitere Frequenzumwandler .....	258
15.4 Umwandlung von Zeitsignalen .....	259
15.4.1 Zeit-Amplitude-Umsetzer (TAC) .....	259

15.4.2 Koinzidenzen .....	259
15.4.3 Zeit-Digital-Umsetzer (TDC) .....	261
15.4.4 Zeitmittelwertbildner ('mean-timer') .....	261
15.5 Analog-Digital-Umsetzer (ADCs) .....	262
15.5.1 Parallelkonversion (FADCs) .....	262
15.5.2 Die inkrementelle Technik .....	263
15.5.3 Die schrittweise Näherung ('successive approximation') .....	264
15.5.4 Die Methode der gleitenden Schwellen .....	264
15.5.5 Serielle Konversion .....	265
15.E DO IT YOURSELF .....	266
16. Kernphysikalische Meßanordnungen .....	272
16.1 Flugzeitmessungen .....	272
16.2 Messung von Energiespektren mit Teilchenidentifizierung .....	275
17. Der Vielkanalanalysator und seine Anwendungen .....	279
17.1 Der Vielkanalanalysator (VKA) .....	279
17.2 Anwendungen des VKA .....	280
17.2.1 Der Vielfachzählerbetrieb .....	281
17.2.2 Messung von Mößbauer-Spektren .....	281
17.2.3 Messung von Signalhöhenwahrscheinlichkeiten .....	282
17.2.4 Zweiparametrische Vielkanalanalysatoren .....	282
17.3 Der Signalhöhenmittler .....	283
18. Messung kleiner Signale .....	285
18.1 Elektrometer-Multimeter .....	285
18.2 Störungen bei der Messung kleiner Signale .....	287
18.2.1 Rauschen .....	288
18.2.2 Äußere Störeinflüsse .....	291
18.3 Rauschkenngrößen .....	293
18.4 Techniken zur Messung kleiner Signale .....	294
18.E DO IT YOURSELF .....	296
Anhang A: Eigenschaften von Übertragungsleitungen .....	297
Anhang B: Gruppen- und Phasengeschwindigkeit .....	299
Anhang C: Rechnen mit komplexen Zahlen .....	300
Anhang D: Verzeichnis der Übungsaufgaben .....	303
Anhang E: Zum Analyseprogramm PSPICE .....	306
Anhang F: Zur Bearbeitung der Experimentievorschläge .....	309
Quellen und Literaturhinweise .....	314
Sachregister .....	315