

Heinz Vetter

Schaltungstechnische Praxis

Grundlagen und Methoden

Herausgegeben von Prof. Dr. rer. nat. W.-J. Becker
Prof. Dr. Ing. Dr. h. c. K. W. Bonfig
Dipl. Ing. K. Höing

Mit einem Vorwort von Dipl. Ing. K. Höing



Verlag Technik Berlin

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	5
Einleitung des Herausgebers	8
Inhaltsverzeichnis	10
Verwendete Symbole	17
1 Verhalten passiver Bauelemente bei hohen Frequenzen	22
1.1 Einführung	22
1.1.1 Konzentrierte Schaltelemente (Elementarzweipole)	22
1.1.2 Ideale, passive Bauelemente	23
1.1.2.1 Eigenschaften des ohmschen Elementarzweipoles	23
1.1.2.2 Eigenschaften des induktiven Elementarzweipoles	24
1.1.2.3 Eigenschaften des kapazitiven Elementarzweipoles	24
1.1.2.4 Eigenschaften idealer Stromversorgungen	24
1.1.3 Reale, passive Bauelemente	25
1.2 Eigenschaften realer, passiver Bauelemente	25
1.2.1 Ohmsche Widerstände	25
1.2.1.1 Rauschen ohmscher Widerstände	25
1.2.1.2 Skineffekt (Hauteffekt)	27
1.2.1.3 Ersatzschaltbilder und Eigenschaften von ohmschen Widerständen bei hohen Frequenzen	28
1.2.2 Kondensatoren	29
1.2.2.1 Idealer, kapazitiver Widerstand	30
1.2.2.2 Realer, kapazitiver Widerstand (verlustbehaftet)	32
1.2.2.3 Kondensatoren und ihre Einsatzbereiche	35
1.2.3 Spulen (Induktivitäten)	36
1.2.3.1 Idealer, induktiver Widerstand	37
1.2.3.2 Realer, induktiver Widerstand (verlustbehaftet)	39
1.3 SMD-Technik	45
1.4 Übungen	46
2 Passive Eintore (Zweipolnetzwerke)	50
2.1 Einleitung	50
2.2 Einkreisige LC-Filter	51
2.2.1 Reihenschwingkreis	51
2.2.1.1 Grundformeln	51
2.2.1.2 Bestimmung der Bandbreite des Schwingkreises	54
2.2.1.3 Berechnung der Spannungen an den Schaltelementen	56
2.2.1.4 Anschluss von Generator und Last an den Reihenschwingkreis	57
2.2.1.5 Berechnung der Pol-Nullstellenverteilung	58
2.2.2 Parallelschwingkreis	62
2.2.2.1 Grundformeln	62
2.2.2.2 Berechnung der Ströme in den einzelnen Schaltelementen	66

2.2.2.3 Anschluss von Generator und Last an den Parallelschwingkreis	67
2.2.2.4 Berechnung der Pol-Nullstellenverteilung	68
2.3 Zusammenfassung Schwingkreise	69
2.4 Übungen	70
3 Zweitore (Vierpole)	78
3.1 Vierpolparameter	78
3.1.1 Hybridparameter oder h-Parameter	79
3.1.2 Leitwertparameter oder y-Parameter	80
3.1.3 Streuparameter oder s-Parameter	82
3.2 Vierpolbetriebsgrößen	86
3.2.1 Allgemeingültige Festlegungen	86
3.2.2 Berechnung der Vierpolbetriebsgrößen mittels h-Parameter	88
3.2.3 Berechnung der Vierpolbetriebsgrößen mittels y-Parameter	90
3.2.4 Berechnung der Verstärkung mittels s-Parameter	90
3.3 Übertragungsfunktion	93
3.4 Selektive Netzwerke	95
3.4.1 Tiefpässe (TP)	95
3.4.1.1 TP-1. Grades, unbelastet (ein Blindelement)	95
3.4.1.2 TP-2. Grades, unbelastet, nicht entkoppelt (zwei Blindelemente)	98
3.4.1.3 TP-2. Grades, unbelastet, entkoppelt (zwei Blindelemente)	102
3.4.1.4 Bestimmung der Flankensteilheit der drei Varianten	103
3.4.2 Hochpässe (HP)	104
3.4.2.1 HP-1. Grades, unbelastet (ein Blindelement)	104
3.4.2.2 HP-2. Grades, unbelastet, entkoppelt (zwei Blindelemente)	106
3.4.3 Verallgemeinerung auf unbelastete, entkoppelte Filter n. Grades	107
3.4.4 Bandpässe	108
3.4.4.1 RLC-Bandpass	108
3.4.4.2 RC-Bandpass (Wien-Glied)	112
3.4.5 Bandsperren	114
3.4.5.1 RLC-Bandsperre	114
3.4.6 Zweikreisiges Bandfilter	115
3.4.6.1 Ermittlung des normierten Amplituden-Frequenzgangs	115
3.4.6.2 Bestimmung der Welligkeit	117
3.4.6.3 Bestimmung der Bandbreite als Funktion der normierten Kopplung	118
3.4.6.4 Normierung der Bandbreite des Bandfilters auf die der Einzelkreise	118
3.5 Phasenlaufzeit und Gruppenlaufzeit von Vierpolen	121
3.6 Übungen	123
4 Leitungsanpassung	130
4.1 Breitbandige Impedanzanpassung mit Widerstandsnetzwerken aus ohmschen Widerständen [3]	130
4.1.1 Widerstandszuschaltung	130
4.1.2 L-Glied-Schaltungen ($Z_G < Z_V$)	131
4.1.3 L-Glied-Schaltungen ($Z_G > Z_V$)	132
4.1.4 T-Glied-Schaltungen	132
4.1.5 π -Glied-Schaltungen	133
4.2 Schmalbandtransformatoren	133
4.2.1 Collinsfilter	133
4.2.2 Resonanztransformator anderer Bauform	135
4.3 Breitbandtransformatoren	135
4.3.1 50- Ω -Technik	135

4.3.2 Übertrager	136
4.3.2.1 Impulsübertrager	136
4.3.2.2 Ringkerntransformator [4]	140
4.4 Übungen	143
5 Kleinsignalverhalten von Transistoren in Emitterschaltung	145
5.1 NF-Anwendungen (h-Parameter)	145
5.1.1 Kennlinienfeld in Emitterschaltung	146
5.1.2 Statische Grundschtaltung, Aussteuerung, Leistungsbilanz	150
5.1.3 Dynamisches Verhalten der Grundverstärkerstufe in Emitterschaltung	152
5.1.4 Statische Dimensionierung bipolarer Transistoren in Emitterschaltung	156
5.1.4.1 Speisung mit Basisvorwiderstand (statische Stromspeisung)	157
5.1.4.2 Speisung mit Basisspannungsteiler (statische Spannungsspeisung)	158
5.1.4.3 Kopplungsvarianten für mehrstufige Verstärker	160
5.1.5 Berechnung von Breitbandverstärkern mit RC-Kopplung in Emitterschaltung bei Mittelfrequenz	161
5.1.6 Berechnung des Frequenzgangs dargestellt an Emitterstufen	166
5.1.6.1 Frequenzverhalten einer Breitbandverstärkerstufe ganz allgemein	166
5.1.6.2 Ersatzschaltbild bei mittleren Frequenzen	168
5.1.6.3 Ersatzschaltbild bei hohen Frequenzen	170
5.1.6.4 Ersatzschaltbild bei niedrigen Frequenzen	171
5.2 HF-Anwendungen (y-Parameter)	176
5.2.1 Transistorersatzschaltbild für Leitwertparameter	176
5.2.2 Miller-Theorem und Miller-Kapazität	178
5.2.3 Neutralisation	180
5.2.4 Selektivverstärker (Schmalbandverstärker)	184
5.2.4.1 Aufgaben und Grundstruktur	184
5.2.4.2 Allgemeingültige Vorbemerkungen zu Selektionsverstärkern	186
5.2.4.3 Einzelkreisverstärker mit Hochpunktkopplung	187
5.2.4.4 Einzelkreisverstärker mit transformatorischer Kopplung	192
5.2.4.5 Einzelkreisverstärker mit Spartransformator	194
5.2.4.6 Schaltungen mit n gleichen, auf Bandmittelfrequenz abgestimmten Resonanzverstärkern	196
5.2.4.7 Bandfilterverstärker mit zweikreisigen Bandfiltern	197
5.3 Übungen	201
6 Kleinsignalverhalten von unipolaren Transistoren in Sourceschaltung	208
6.1 Allgemeines	208
6.2 Verstärkeranwendungen	209
6.2.1 Kennlinienfelder in Sourceschaltung	209
6.2.2 Arbeitspunkteinstellung	211
6.2.3 Dynamisches Verhalten der Grundverstärkerstufe	213
6.2.3.1 Verstärkungsberechnung	213
6.2.3.2 Einige Beispieldaten	215
6.2.3.3 Großsignalverhalten unipolarer Transistoren	215
7 Transistoren in Basis- (Gate-), Kollektor- (Drain-) schaltung und Kaskadenschaltung	219
7.1 Umrechnungsgleichungen	219
7.2 Basis- und Gateschaltung	221
7.3 Kollektor- und Drainschaltung	224
7.4 Übungen	228

7.5 Kaskadenverstärker	236
7.5.1 Darlington-Verstärker	236
7.5.2 Kaskodeschaltungen	240
8 Operationsverstärker	243
8.1 Allgemeines	243
8.2 Beschreibung einiger Funktionsgruppen des OPV	244
8.2.1 Differenzverstärker	244
8.2.2 Konstantstromquelle und Stromspiegelschaltung	245
8.2.3 Pegelanpassstufe	247
8.3 Kenngrößen von Operationsverstärkern	248
8.3.1 Darstellung des OPV'	248
8.3.2 Grundeigenschaften des Operationsverstärkers	248
8.3.3 Idealer Operationsverstärker	251
8.4 Grundschaltungen und ihre Anwendungen	252
8.4.1 Invertierender Verstärker	252
8.4.2 Nichtinvertierender Verstärker	253
8.4.3 Wechselspannungsverstärker mit Driftunterdrückung	254
8.4.4 Weitere Anwendungen	255
8.5 Kompensationsschaltungen	257
8.5.1 Ruhestromkompensation	257
8.5.2 Offsetspannungskompensation	259
8.5.3 Frequenzgangkompensation	259
8.6 Slew-Rate	264
8.7 Übungen	266
9 Großsignalverhalten von Transistoren	274
9.1 Einleitung	274
9.1.1 Verlustleistung, Kühlfläche und Temperatur	278
9.1.2 Verlustleistung im dynamischen Betrieb	278
9.2 Berechnung von NF-Endstufen	279
9.2.1 A-Endstufen mit ohmscher Last	279
9.2.1.1 Leistungsinnenwiderstand	280
9.2.1.2 Ausgangswechsellleistung	281
9.2.1.3 Aufgenommene Gleichleistung	282
9.2.1.4 Wirkungsgrad	282
9.2.1.5 Verlustleistung	282
9.2.2 A-Endstufe mit Ausgangsübertrager	283
9.2.3 AB- und B-Gegentaktendstufen	286
9.2.3.1 Quasikomplementärendstufe (AB- und B-Verstärker)	290
9.2.4 Spezielle Probleme	294
9.2.4.1 Bootstrap-Prinzip	294
9.2.4.2 Dimensionierung des Ladekondensators C_L	296
9.2.4.3 Übernahmeverzerrungen	297
9.2.4.4 Kühlprobleme	299
9.3 Sendeendstufen (HF-Endstufen)	300
9.3.1 Oberwellenbetrachtungen zum C-Betrieb	300
9.3.1.1 Mathematische Ermittlung des Stromflusswinkels	301
9.3.1.2 Fourieranalyse der Stromimpulse	302
9.3.2 HF-Leistungsverstärkung	306
9.3.2.1 Leistungsverstärkung mit Röhren	306
9.3.2.2 Leistungsverstärkung mit Transistoren	310

9.3.2.3 Frequenzvervielfacher	313
9.4 Übungen	314
10 Signalverzerrungen	323
10.1 Störstrahlung	323
10.2 Rauschen	325
10.2.1 Thermisches Rauschen	325
10.2.2 Rauschen eines komplexen Widerstandes Z	326
10.2.3 Rauschen aktiver Bauelemente	327
10.2.1.1 Schrotrauschen in der Vakuumdiode	328
10.2.1.2 Rauschzahl, Rauschmaß	331
10.2.1.3 Zusatzrauschzahl	334
10.2.1.4 Rauschtemperatur	335
10.2.1.5 Rauschen mehrstufiger Verstärker	335
10.3 Nichtlineare Verzerrungen	337
10.4 Zusammenhang-Grenzfrequenz und Impulsantwort	343
10.5 Übungen	346
11 Gegenkopplung	352
11.1 Allgemeine Zusammenhänge	352
11.2 Dynamische Gegenkopplung	356
11.2.1 Stromgegenkopplung als SS-GK	356
11.2.2 Spannungsgegenkopplung als PP-GK	360
11.2.3 Serien-Parallel- und Parallel-Serien-Gegenkopplung	363
11.2.4 Zusammenhang zwischen Mitkopplung und Gegenkopplung	365
11.2.5 Zwei Gegenkopplungsarten in einer Stufe	366
11.2.6 Variantenvergleich zur Gegenkopplung über mehrere Stufen	368
11.2.7 Schlussfolgerungen zu den Gegenkopplungsüberlegungen	370
11.2.8 Stabilitätsprobleme	372
11.2.9 Zusammenstellung der Ergebnisse der GK für die Leitwertparameter	374
11.3 Übungen	375
12 Harmonische Oszillatoren.	384
12.1 Prinzip der Mitkopplung	384
12.1.1 Amplitudenbedingung	386
12.1.2 Phasenbedingung	388
12.2 LC-Oszillatoren	390
12.2.1 Meißner-Oszillator	390
12.2.2 Dreipunkt-Oszillatoren	395
12.2.2.1 Induktive Dreipunktschaltung (Hartley-Oszillator)	399
12.2.2.2 Kapazitive Dreipunktschaltung (Colpitts-Oszillator)	401
12.2.2.3 Verteilte kapazitive Dreipunktschaltung (Clapp-Oszillator)	403
12.3 RC-Oszillatoren	406
12.3.1 Phasenkettenoszillator	406
12.3.2 Wien-Brücken-Oszillator	409
12.4 Oszillatoren mit Operationsverstärkern	412
12.4.1 Phasenkettenoszillator mit Operationsverstärker	412
12.4.2 Wien-Brücken-Oszillator mit Operationsverstärker	413
12.5 Quarzoszillatoren	415
12.5.1 Einige grundsätzliche Bemerkungen zu Schwingquarzen	415
12.5.2 Colpittsquarzoszillator	419
12.5.3 Temperaturkompensierter Quarzoszillator	422

12.6	Übungen	423
13	Modulation	432
13.1	Amplitudenmodulation	432
13.1.1	Begriffsbestimmung	432
13.1.2	Ideale Amplitudenmodulation	435
13.1.3	Reale Amplitudenmodulation	440
13.1.4	Leistungsverhältnisse bei Amplitudenmodulation	444
13.1.5	Schaltungstechnik	445
13.1.5.1	Arbeitspunkteinstellung	445
13.1.5.2	Modulatorschaltungen	447
13.1.6	Demodulation	457
13.1.7	Übungen	462
13.2	Einseitenbandmodulation	466
13.2.1	Vergleich zwischen ESB-AM und ZSB-AM	466
13.2.1.1	Bandbreitengegenüberstellung	466
13.2.1.2	Leistungsbilanz	467
13.2.1.3	Vergleich der Signal-Rauschverhältnisse	468
13.2.2	Technische Realisierung der Einseitenbandtechnik	469
13.2.2.1	Filtermethode	469
13.2.2.2	Kompensationsmethode	471
13.2.3	Demodulation von empfangenen Einseitenbandsignalen	479
13.2.3.1	Möglichkeit des Trägerzusatzes	479
13.2.3.2	Verzerrungen in Abhängigkeit von der zugesetzten Trägeramplitude	481
13.2.3.3	Untersuchung einer Demodulatorschaltung	483
13.2.3.4	Kompatibilität	486
13.2.4	Anwendung der Einseitenbandmodulation	486
13.2.5	Zusammenfassung	488
13.3	Winkelmodulation	489
13.3.1	Grundlagen	489
13.3.1.1	Zeitfunktion der Winkelmodulation	490
13.3.1.2	Frequenzamplitudenspektrum der Winkelmodulation	495
13.3.1.3	Zeigerdarstellung winkelmodulierter Signale	496
13.3.1.4	Bestimmung der erforderlichen HF-Übertragungsbandbreite	499
13.3.1.5	Schmalband-Frequenzmodulation	501
13.3.1.6	Grenzbedingungen für den Modulationsindex	503
13.3.1.7	Leistungsbilanz für winkelmodulierte Signale	505
13.3.2	Störabstand bei winkelmodulierten Signalen	507
13.3.2.1	Technische Realisierung der Störabstandsverbesserung	510
13.3.3	Schaltungstechnik zur Realisierung winkelmodulierter Signale	513
13.3.3.1	Allgemeines zu Modulatorschaltungen	513
13.3.3.2	Reaktanzstufen	518
13.3.3.3	Beispiele für Frequenzmodulatoren	520
13.3.3.4	Beispiele für Phasenmodulatoren	525
13.3.4	Vervielfacher	530
13.3.5	Demodulation winkelmodulierter Signale	532
13.3.5.1	Theoretischer Hintergrund zur Demodulation von WM-Signalen	532
13.3.5.2	Einflankendemodulator	534
13.3.5.3	Gegentaktflankendemodulator	536
13.3.5.4	Riegger-Kreis (Phasendiskriminator)	537
13.3.5.5	Ratiodetektor	540
13.3.5.6	Koinzidenzdemodulator	542

13.3.6	Übungen	544
14	Filtersysteme	551
14.1	Bandfilterverstärker	551
14.1.1	Vorbetrachtungen	551
14.1.2	Verstärker mit "m" gegeneinander verstimmt 14.1.2.1 Allgemeine Dimensionierungsgrundlagen	552
14.1.2.2	Dimensionierungsalgorithmus für den Potenzverstärker	556
14.1.2.3	Dimensionierungsalgorithmus für den Tschebyscheffverstärker	557
14.1.3	Verstärker mit Zweikreisbandfilter und Hochpunktkopplung	558
14.1.3.1	Selektivität	562
14.1.3.2	Bandbreiten	564
14.1.4	Schaltung und Dimensionierung von mehrkreisigen Bandpassfiltern	564
14.2	Filterberechnung nach der Wellenparametertheorie	565
14.2.1	Allgemeine Vorbetrachtungen	565
14.2.2	Ableitung der Leitungsgleichungen	566
14.2.2.1	Darstellung der Leitungsgleichungen in Kettenparameterform	573
14.2.3	Berechnung der Filter nach der Wellenparametertheorie	575
14.2.3.1	Allgemeine Gleichungen	575
14.2.3.2	Tiefpass bestehend aus zwei LC-Halbgliedern in T-Glied-Schaltung	578
14.2.3.3	Tiefpass bestehend aus zwei LC-Halbgliedern in π -Glied-Schaltung	586
14.2.3.4	Hochpass-T- und π -Glieder bestehend aus LC-Halbgliedern	587
14.2.3.5	Zusammenfassung der Filterdimensionierung (Wellenparametertheorie)	588
14.3	Übungen	590
15	Leitungstechnik	607
15.1	Problemstellung	607
15.2	Wellenausbreitung auf Leitungen	609
15.2.1	Untersuchung der hinlaufenden Welle	611
15.2.2	Reflexionen am Leitungsende	614
15.2.2.1	Ergänzungen und Formelzusammenstellungen	620
15.3	Leitungstransformationseigenschaften	623
15.3.1	Impedanztransformationen	623
15.3.2	Leistungsumsatz im Abschlusswiderstand	626
15.3.2.1	Formelzusammenstellung und Ergänzungen (Leitungstransformation)	628
15.3.3	Smith-Diagramm	631
15.3.3.1	Arbeiten mit dem Smith-Diagramm	638
15.3.3.2	Leitwertdiagramm	648
15.4	Leitungsresonatoren	651
15.4.1	Resonatoren aus Lecher- und Koaxialleitungen	652
15.4.2	Güte und Reflexionsfaktor von Topfkreisen	656
15.5	Übungen	659
16	Literaturverzeichnis	667
17	Register	670