

Inhaltsverzeichnis

1	Die 10 wichtigsten Lösungsmethoden der Schaltungstechnik	1
1.1	Ohm'sches Gesetz	1
1.2	Die ideale Spannungsquelle	1
1.3	Die ideale Stromquelle	2
1.4	Kirchhoff'sches Gesetz Nr. 1	3
1.5	Kirchhoff'sches Gesetz Nr. 2	3
1.6	Stern-Dreieck-Umwandlung	3
1.7	Aufteilung einer Sternschaltung	4
1.8	Spannungsteiler und umgekehrter Spannungsteiler	4
1.9	Quellenverschiebung	5
1.10	Quotientenmethode	6
1.10.1	Der Operator für Parallelschaltung: $\parallel$	6
1.10.2	Grundlagen	7
1.10.3	Anwendungen bei Spannungsteilern	7
1.10.4	Allgemeine Regeln bei Spannungsteilern	9
1.10.5	Anwendungen bei Stromteilern	10
1.10.6	Zusammenfassung	10
1.10.7	Erweiterter Spannungsteiler	12
1.10.8	Erweiterter Stromteiler	13
2	Diode	15
2.1	Kennlinie und Ersatzschaltung	15
2.2	Scherung einer Diodenkennlinie mit einem Widerstand	17
2.3	Beispiele zu Diodenschaltungen	17
2.3.1	Beispiel 1	17
2.3.2	Beispiel 2	19
2.3.3	Beispiel 3	21
2.3.4	Beispiel 4	22

3	Transistoren	23
3.1	Vorbemerkungen zu Transistorersatzschaltbildern	23
3.2	Gleichstrombetrachtung beim NPN Bipolartransistor	24
3.2.1	Ersatzschaltbild des Bipolartransistors	24
3.2.2	Einfache Arbeitspunkteinstellung	26
3.2.3	Verbesserte Arbeitspunkteinstellung	27
3.2.4	Sehr stabile Arbeitspunkteinstellung	29
3.2.5	Verlustleistung im Transistor	31
3.2.6	PNP Transistor	32
3.3	Kleinsignalbetrachtung beim Bipolartransistor	32
3.3.1	Verschiedene Kleinsignalschaltungen	32
3.3.2	Emitterschaltung	33
3.3.3	Emitterschaltung mit Millereffekt	36
3.3.4	Kollektorschaltung	41
3.3.5	Kollektorschaltung mit Bootstrapeffekt	43
3.3.6	Basisschaltung	47
4	Feldeffekt-Transistor	49
4.1	Arbeitspunkt bei Feldeffekt-Transistoren	49
4.1.1	Einfache Arbeitspunkteinstellung	49
4.1.2	Sehr stabile Arbeitspunkteinstellung	52
4.1.3	Beispiel	54
4.2	Sourceschaltung	55
4.3	Drainschaltung	56
4.4	Gateschaltung	57
5	Der ideale Operationsverstärker	59
5.1	Grundlegende Funktion	59
5.2	Invertierender Verstärker	60
5.3	Rückkopplung	64
5.4	Nichtinvertierender Verstärker	65
5.5	Subtrahierschaltung	67
5.6	Differenzverstärker	68
5.7	Widerstandsumrechnung	71
5.8	Schaltungsberechnung mit dem Überlagerungssatz	72
5.9	Integrierer	73
5.10	Differenzierer	73
5.11	Komparator	74
5.12	Der invertierende Komparator	74
5.13	Der nichtinvertierende Komparator	75

6	Der reale Operationsverstärker	77
6.1	Offsetfehler	77
6.1.1	Eingangskennwerte (Offsetgrößen)	78
6.2	Ersatzschaltbild des realen Operationsverstärkers mit den Eingangskennwerten	79
6.3	Sonderfall, Transformation der Offsetspannung	82
6.3.1	1. Möglichkeit der Berechnung	83
6.3.2	2. Möglichkeit der Berechnung	84
7	Einführung in das Bodediagramm	87
7.1	Bodediagramm Tiefpass	87
7.2	Die 5 elementaren Bodediagramme	89
7.3	Daraus abgeleitete einfache Bodediagramme	89
7.4	Wichtige Erkenntnisse im Bodediagramm	91
7.5	Zusammenfassung zweier Bodediagramme	93
7.6	Konstruktion von Bodediagrammen	96
7.7	Impedanzen im Bodediagramm, Grundlagen	98
7.8	Serien-und Parallelschaltungen von Impedanzen	98
7.9	Spannungs-und Stromteiler aus R und C sowie R und L	100
7.10	Y-Transfer-Parameter	103
7.11	Subtraktion im Bodediagramm	106
7.11.1	Grundlagen	106
7.11.2	Einige weitere Subtraktionen	110
7.11.3	Schaltungsbeispiel zur Subtraktion im Bodediagramm	112
8	Das Bodediagramm des Operationsverstärkers und dessen Einfluss auf Schaltungen	115
8.1	Das Bodediagramm des Operationsverstärkers	115
8.2	Einfluss der realen Verstärkung des Operationsverstärkers auf eine Schaltung	116
8.2.1	Allgemeiner Ansatz für die Verstärkung einer OP-Schaltung	116
8.2.2	Nichtinvertierender Verstärker	117
8.2.3	Invertierender Verstärker	118
8.2.4	Einfluss der Verstärkung auf die Grenzfrequenz (Bandbreite)	121
8.2.5	Einfluss des Ausgangswiderstandes auf die Verstärkung der OP-Schaltung	121
8.3	Gleich- und Wechselstromfehler von OP-Schaltungen	124
8.3.1	Vereinfachte Darstellung des Verstärkungsfehlers	124
8.3.2	Fehlerberechnung beim zweistufigen Verstärker	127
8.3.3	Fehlerberechnung bei ungenauen Widerständen	130

9	Resonanz im Bodediagramm	131
9.1	Resonanz aus R, L und C	131
9.2	Zusammenhang zwischen Band-, Tief- und Hochpass	132
9.3	Resonanzüberhöhung	137
9.4	Beispiele: Spannungsteiler mit komplexen Bauteilen	143
9.4.1	Beispiel 1	143
9.4.2	Beispiel 2: Komplizierter Spannungsteiler	143
10	Resonanzüberhöhung (Gain-Peaking)	147
10.1	Mathematische Grundlagen	147
10.2	Berechnung der Phasenreserve bei f^*	149
10.3	Berechnung des Gain-Peakings	150
10.4	Berechnung der Grenzfrequenz bei Gain-Peaking	152
10.5	Schleifenverstärkung, Stabilität	153
10.6	Tiefpass zweiter Ordnung mit Differenzierglied	155
10.7	Beispiel zu Tiefpass zweiter Ordnung mit Differenzierglied	161
10.8	Tiefpass und Hochpass zweiter Ordnung	163
10.8.1	Ergebnisse für Tief- und Hochpass	163
10.8.2	Beispiel zu Tiefpass zweiter Ordnung	168
10.8.3	Beispiel zu Hochpass zweiter Ordnung	169
10.9	Tiefpass zweiter Ordnung mit Differenzierglied $a = b$	171
10.9.1	Ergebnisse für Tiefpass zweiter Ordnung mit Differenzierglied $a = b$	171
10.9.2	Beispiele: Tiefpass 2. Ordnung mit Differenzierglied $a = b$	174
10.10	Bandpass	189
10.10.1	Grundlagen	190
10.10.2	Beispiel: Bandpass	191
10.11	Vergleich: Schaltungen zweiter Ordnung	192
10.12	Grafische Lösungen	194
10.12.1	Tiefpass 2. Ordnung	194
10.12.2	Tiefpass zweiter Ordnung mit Differenzierglied	196
11	Transformationen beim Operationsverstärker	199
11.1	Millertheorem	199
11.2	Millereffekt	200
11.3	Umgekehrter Millereffekt	203
11.4	Bootstrapeffekt	205
11.5	Umgekehrter Bootstrapeffekt	206
11.6	Dualität von Miller- und Bootstrapeffekt	208

11.7	Problemfälle bei Operationsverstärkerschaltungen	208
11.7.1	Konstruktion der Ausgangsspannung beim Millereffekt	210
11.7.2	Konstruktion der Ausgangsspannung beim Bootstrapeffekt	212
12	Überschwingen	215
12.1	Definition der Symbole	215
12.2	Herleitung der Übertragungsfunktion in Verstärkerschaltungen	215
12.2.1	Übertragungsfunktionen in Verstärkerschaltung mit Rückkopplung als Tiefpass (Fall A)	216
12.2.2	Übertragungsfunktionen in Verstärkerschaltung mit Rückkopplung als Bandsperre (Fall B)	220
12.2.3	Fazit zu Übertragungsfunktionen in Verstärkerschaltung (Fälle A und B)	226
12.3	Herleitung der Impulsantwort wichtiger Übertragungsfunktionen mittels Laplace-Transformation	226
12.3.1	Impulsantwort des Tiefpasses 2. Ordnung	226
12.3.2	Impulsantwort des Tiefpasses 2. Ordnung mit Differenzierglied	233
12.3.3	Impulsantwort des Hochpasses	240
12.3.4	Impulsantwort des Bandpasses	245
12.4	Zusammenfassung der Ergebnisse	248
12.4.1	Tiefpass zweiter Ordnung	248
12.4.2	Tiefpass zweiter Ordnung mit Differenzierglied	253
12.4.3	Tiefpass zweiter Ordnung mit Differenzierglied, Sonderfall $b = a$	257
12.4.4	Hochpass	261
12.4.5	Bandpass	266
12.5	Stabilität typischer Schaltungen, Beispiele	272
12.5.1	Tiefpass, Hochpass und Bandpass	272
12.5.2	Tiefpass zweiter Ordnung	272
12.5.3	Hochpass zweiter Ordnung	274
12.5.4	Bandpass	276
12.5.5	Tiefpass zweiter Ordnung mit Differenzierglied ($a = b$) ...	277
12.5.6	Tiefpass zweiter Ordnung mit Differenzierglied ($a \neq b$) ...	280
13	Gleichtaktverstärkung, Gleichtaktunterdrückung	283
13.1	Grundlagen	283
13.2	Differenzverstärker mit einem Operationsverstärker	286
13.2.1	Differenzverstärkung	286
13.2.2	Gleichtaktverstärkung, Gleichtaktunterdrückung	287

13.3	Verbesserte Differenzverstärkerschaltung	292
13.3.1	Differenzverstärker mit kapazitivem Eingangsspannungsteiler	297
13.4	Differenzverstärker mit zwei Operationsverstärkern	302
13.5	Erweiterter Differenzverstärker mit zwei Operationsverstärkern	306
14	Slew-rate, Anstiegszeit	309
14.1	Slew-rate S_{max}	309
14.2	Anstiegszeit und Grenzfrequenz	311
14.3	Anwendung bei Operationsverstärkerschaltungen.	313
15	Stromquellen mit Operationsverstärkern.	317
15.1	Einfache Stromquelle.	317
15.2	Stromquelle mit potentialfreier Spannungsquelle	319
15.2.1	Stromquelle mit einem Operationsverstärker.	319
15.2.2	Stromquelle mit zwei Operationsverstärkern.	322
15.3	Howland-Stromquelle	329
15.3.1	Berechnung der Howland-Stromquelle mit idealen Bauteilen	329
15.3.2	Berechnung der Howland-Stromquelle mit realen Bauteilen	331
15.4	Stromquelle mit zwei Operationsverstärkern.	334
15.4.1	Berechnung der Stromquelle mit idealen Bauteilen	334
15.4.2	Berechnung der Stromquelle mit realen Bauteilen	337
15.5	Stromquelle für kleine Ströme.	341
15.6	Stromquelle mit erhöhter Grenzfrequenz.	342
15.6.1	Berechnung der Stabilität.	344
15.6.2	Innenwiderstand der Stromquelle	348
15.7	Stromquelle für größeren Strom	350
15.7.1	Berechnung des Stromes und der Grenzfrequenz	352
15.7.2	Berechnung der Stromquelle mit realen Bauteilen	353
16	Kompositverstärker	357
16.1	Kompositverstärker mit Doppel-Operationsverstärker	357
16.1.1	Lösung mit Bodediagramm	357
16.1.2	Lösung mit der Schleifenverstärkung	361
16.1.3	Verstärkungsfehler der Schaltung	361
16.2	Kompositverstärker mit 2 Operationsverstärkern	363
16.3	Kompositverstärker mit hoher Grenzfrequenz.	366
17	Filter	369
17.1	Tief- und Hochpassfilter.	369
17.2	Zwei Tiefpässe in Serie	369
17.3	Zwei Hochpässe in Serie	371

17.4	Verschiebung einer Grenzfrequenz durch ein weiteres Filter	372
17.5	Schmalbandiger passiver Bandpass	375
17.5.1	Passive Schaltung	375
17.5.2	Bodediagramm des Eingangs- und Ausgangswiderstandes	376
17.5.3	Formelmäßiger Zusammenhang	376
17.5.4	Beispiel 1 $f_R = 100 \text{ kHz}$	377
17.5.5	Beispiel 2 $f_R = 1 \text{ MHz}$	379
17.6	Einfacher Bandpass mit Operationsverstärker	382
17.6.1	Beispiel 1	382
17.6.2	Beispiel 2	383
17.6.3	Beispiel 3: Tiefpass mit-und ohne Differenzierverhalten	388
17.7	Sallen-Key-Filter	393
17.7.1	Tiefpass	393
17.7.2	Bandpass	396
17.7.3	Hochpass	398
17.8	Aktiver Tief- und Bandpass	402
17.9	Aktiver Tief- und Bandpass mit Differenzierglied	404
17.10	Aktiver Tiefpass, grafische Lösung	408
17.11	Filter ohne Kapazitäten	411
17.11.1	Tiefpass 2. Ordnung	411
17.11.2	Tiefpass 3. Ordnung	413
17.11.3	Hochpass 2. Ordnung	415
17.11.4	Hochpass 3. Ordnung	418
18	Operationsverstärkerschaltungen I (Grundlagen)	421
18.1	Frequenzgang eines Operationsverstärkers	421
18.2	Frequenzgang einer Operationsverstärkerschaltung	422
18.3	Allgemeine Herleitung des Frequenzganges	422
18.4	Nichtinvertierender Verstärker	423
18.5	Spannungsfolger, Impedanzwandler	424
18.6	Nichtinvertierender Verstärker mit Tiefpass	425
18.7	Invertierender Verstärker	426
18.8	Invertierender Verstärker mit Tiefpass	428
18.9	Integrierer	429
18.10	Differenzierer	430
18.10.1	Vereinfachte Betrachtung beim Differenzierer	433
18.11	Komparator	434
18.11.1	Berechnungsverlauf	434
18.11.2	Zeichnerische Lösung	436
18.12	Transimpedanzverstärker, Grundlagen	437
18.12.1	Darstellung mit dem Millereffekt	442

18.13	Invertierender Verstärker mit komplexen Bauteilen.	446
18.14	Nichtinvertierender Verstärker mit komplexen Bauteilen	447
18.15	Eingangswiderstand	448
18.15.1	Invertierender Verstärker	448
18.15.2	Integrierer.	449
18.15.3	Differenzierer	450
18.15.4	Differenzierer mit Kompensation.	450
18.15.5	Differenzierer mit großem Eingangswiderstand	452
18.15.6	Spannungsfolger.	453
18.15.7	Nichtinvertierender Verstärker	454
18.15.8	Verstärker mit Mit- und Gegenkopplung	454
18.15.9	Teileingangswiderstände bei Operationsverstärkerschaltungen.	456
18.16	Ausgangswiderstand	461
18.16.1	Invertierender oder Nichtinvertierender Verstärker	461
18.16.2	Integrierer.	463
18.16.3	Differenzierer	465
18.17	Beispiele.	468
18.17.1	Beispiel 1	468
18.17.2	Beispiel 2	470
18.17.3	Beispiel 3	472
18.17.4	Beispiel 4	475
18.17.5	Beispiel 5	477
18.17.6	Beispiel 6	479
19	Operationsverstärkerschaltungen II (Weiterführende Schaltungen)	483
19.1	Gleichrichterschaltungen	483
19.1.1	Die ideale Diode.	483
19.1.2	Einfache Gleichrichterschaltung	484
19.1.3	Verbesserte Gleichrichterschaltung	485
19.2	Spannungsfolger mit reduzierter Grenzfrequenz.	487
19.3	Verstärker mit Mit- und Gegenkopplung	490
19.4	Verstärker mit zwei Stufen.	493
19.5	Verstärkerschaltungen mit komplexen Bauteilen.	495
19.5.1	Beispiel 1	495
19.5.2	Beispiel 2	497
19.6	Induktiver Sensor	500
19.6.1	Lösung mit dem Bootstrapeffekt	501
19.6.2	Lösung mit der Schleifenverstärkung	505
19.6.3	Lösung mit der Quotientenmethode.	505
19.7	Schaltung zur Induktivitätsmultiplikation	507
19.8	Verstärkerschaltung mit doppelter Rückführung	509

19.9	Transimpedanzverstärker mit Gleichlichtkompensation	511
19.9.1	Darstellung mit dem Millereffekt.	512
19.9.2	Genaue Konstruktion der Ausgangsspannung	513
19.10	Transimpedanzverstärker (Transformation in die Rückkopplung) . . .	516
19.10.1	Veränderung von f_{3dB} bei konstantem C_f	517
19.11	Transimpedanzverstärker für große Fotodioden	518
20	Transistorschaltungen bei höheren Frequenzen	529
20.1	Transformationen bei Kleinsignalbetrachtung.	529
20.1.1	Transformationen vom Emitter (Source) zur Basis (Gate)	532
20.1.2	Transformationen von der Basis (Gate) zum Emitter (Source).	538
20.1.3	Veränderung von f_β durch einen Widerstand R_c	543
20.1.4	Millereffekt bei der Emitterschaltung	544
20.1.5	Vergleich Emitter-Basis-Kollektorschaltung	548
20.2	Beispiele (Kleinsignalbetrachtung)	552
20.2.1	Emitterschaltung	552
20.2.2	Emitterschaltung mit Millerwiderstand	555
20.2.3	Sourceschaltung	556
20.2.4	Induktiver Sensor	563
20.2.5	Kollektorschaltung mit kapazitiver Last	568
20.2.6	Drainschaltung für Induktiven Sensor	573
20.2.7	Bootstrapschaltung für niedere Frequenzen.	577
20.2.8	Kompositverstärker	579
20.3	Stromquellen	582
20.3.1	Stromquelle mit Transistor.	582
20.3.2	Stromquelle mit Feldeffekttransistor	585
20.3.3	Stromquelle mit Operationsverstärker und Transistor	586
20.4	Stromspiegelschaltungen	587
20.4.1	Einfacher Stromspiegel	588
20.4.2	Einfacher Stromspiegel mit Emitterwiderständen	589
20.4.3	Stromspiegel mit „beta helper“	590
20.4.4	Wilson Stromspiegel	593
20.4.5	Widlar Stromspiegel.	597
20.4.6	Beispiele Stromspiegel.	599
21	Differenzverstärker mit Transistoren	603
21.1	Grundlagen.	603
21.2	Höhere Frequenzen	607
21.3	Differenzverstärkung	608
21.4	Gleichtaktverstärkung	608

21.5	Gleichtaktunterdrückung	610
21.6	Zahlenbeispiel	610
22	Klirrfaktor	613
22.1	Definition des Klirrfaktors	613
22.2	Klirrfaktor bei Bipolartransistoren.	613
22.3	Klirrfaktor bei Feldeffekttransistoren	616
22.4	Klirrfaktor beim Differenzverstärker mit Transistoren	618
22.5	Klirrfaktor beim Differenzverstärker mit Feldeffekttransistoren.	620
22.6	Klirrfaktor-Vergleich Bipolar-und Feldeffekttransistor	622
	Literatur	625
	Stichwortverzeichnis	627