

Inhaltsverzeichnis

1. Grundbegriffe	13
1.1. Operationsverstärker	13
1.2. Operationsschaltung	15
1.3. Idealer Operationsverstärker und ideale Operationsschaltung	16
1.4. Zusammenfassung	17
2. Parameter des Operationsverstärkers	18
2.1. Lineare Parameter und lineares Modell	18
2.1.1. Eingangsfehlerquellen	19
2.1.2. Eingangsoffset und Eingangsdrift	21
2.1.3. Eingangsrauschen	23
2.1.4. Verstärkung, Differenzeingangswiderstand und Ausgangswiderstand	25
2.1.5. Gleichtaktunterdrückung und Gleichtakteingangswiderstände	29
2.2. Nichtlineare Parameter	31
2.3. Einschwingzeit und Erholzeit	33
2.4. Zusammenfassung	35
3. Eigenschaften des Operationsverstärkers	36
3.1. Operationsverstärker mit bipolarem Eingang	36
3.1.1. Eingangsoffsetspannung	38
3.1.2. Temperaturdrift der Eingangsoffsetspannung	40
3.1.3. Auswirkung der anderen Verstärkerstufen	44
3.1.4. Eingangsbiasstrom und Eingangsoffsetstrom	44
3.1.5. Eingangsrauschen	46
3.1.6. Differenzeingangswiderstand	51
3.1.7. Gleichtaktunterdrückung und Gleichtakteingangswiderstände	51
3.2. Operationsverstärker mit FET-Eingang	53
3.2.1. Eingangsoffsetspannung	59
3.2.2. Temperaturdrift der Eingangsoffsetspannung	60
3.2.3. Sekundäre Effekte	63
3.2.4. Gleichtaktunterdrückung	64
3.2.5. Eingangsbiasstrom	65
3.2.6. Eingangsrauschen	66
3.3. Ausführung von Eingangsstufen	68
3.4. Ausgangsstufe	70
3.5. Frequenzkompensation	71
3.6. Zusammenfassung	75

4. Operationsverstärkertypen	78
4.1. Klassifizierungsgesichtspunkte von Operationsverstärkern	78
4.1.1. Fertigungstechnologie	79
4.1.2. Schaltungstechnik	79
4.1.3. Arten der Signaleingänge	80
4.1.4. Programmierbarkeit	81
4.1.5. Ausgangsleistung	81
4.1.6. Verwendungszweck	82
4.2. Zusammenfassung	84
5. Messung der Parameter von Operationsverstärkern	85
5.1. Offset und Rauschen	87
5.1.1. Eingangsoffsetspannung	87
5.1.2. Eingangsoffsetspannungsdrift	87
5.1.3. Eingangsbiasströme und Eingangsoffsetstrom	89
5.1.4. Eingangsbiasstrom- und Offsetstromdrift	91
5.1.5. Eingangsrauschspannung	91
5.1.6. Eingangsrauschströme	94
5.1.7. Popcornrauschen	97
5.2. Verstärkung, Eingangs- und Ausgangsimpedanzen	97
5.2.1. Gleichspannungsverstärkung	97
5.2.2. Transitfrequenz	100
5.2.3. Ausgangswiderstand	101
5.2.4. Gleichspannungsverstärkung bei Belastung	102
5.2.5. Differenzeingangswiderstand	103
5.2.6. Differenzeingangskapazität	104
5.3. Gleichtaktunterdrückung und Gleichtakteingangsimpedanzen	104
5.3.1. Gleichspannungsgleichtaktunterdrückung	104
5.3.2. Gleichtakteingangswiderstände	105
5.3.3. Gleichtakteingangskapazität	105
5.4. Statische Nichtlinearitäten	106
5.4.1. Nennausgangsspannung und Nennausgangsstrom	106
5.4.2. Nengleichtakteingangsspannung	107
5.5. Dynamische Nichtlinearitäten	108
5.5.1. Maximale Ausgangslewrate	108
5.5.2. Großsignalgrenzfrequenz	108
5.6. Betriebsparameter	110
5.6.1. Ruhebetriebsstrom	110
5.6.2. Ausgangskurzschlußstrom	110
5.6.3. Offsetabgleich	111
5.7. Einschwingzeit	111
5.8. Zusammenfassung	111
6. Ideale Operationsschaltungen	114
6.1. Klassen von Operationsschaltungen	114
6.1.1. Rückkopplungsarten	114
6.1.2. Linearität	116
6.1.3. Arbeitsfrequenzbereich	116
6.1.4. Anwendungen	116

6.2.	Paralleloperationsschaltungen	117
6.2.1.	Strom-Spannungs-Wandler	117
6.2.2.	Stromverstärker	118
6.2.3.	Spannungsinverter	119
6.2.4.	Summierender Verstärker	120
6.2.5.	Allgemeiner Inverter	121
6.2.6.	Widerstands-T-Netzwerk	122
6.2.7.	Logarithmischer Verstärker	123
6.2.8.	Diodenbegrenzer	124
6.2.9.	Analogschalter	124
6.2.10.	Integrierer	125
6.3.	Serienoperationsschaltungen	125
6.3.1.	Spannungsverstärker	125
6.3.2.	Spannungsfolger	126
6.3.3.	Spannungs-Strom-Wandler	127
6.4.	Zusammengesetzte Operationsschaltungen	127
6.4.1.	Signalaussteuerung an beiden Eingängen	127
6.4.2.	Mehrfachrückkopplung	130
6.4.3.	Kombinierte negative und positive Rückkopplung	131
6.4.4.	Operationsschaltungen mit mehreren Verstärkern	134
6.4.5.	Unkonventionelle Operationsschaltungen	135
6.5.	Zusammenfassung	135
7.	Analyse der realen Operationsschaltung	137
7.1.	Rückkopplungsfaktor	139
7.1.1.	Definition des Rückkopplungsfaktors	139
7.1.2.	Berechnungsbeispiele für den Rückkopplungsfaktor	142
7.2.	Operationsgleichung	145
7.2.1.	Kanonische Form der Operationsgleichung	145
7.2.2.	Abschreckungsbeispiel	148
7.3.	Verstärkung der Operationsschaltung	149
7.3.1.	Grundform der Verstärkung	149
7.3.2.	Verstärkung der Operationsschaltung und Rückkopplungsfaktor	151
7.3.3.	Frequenzgang der Verstärkung der Operationsschaltung	152
7.3.4.	Beispiele für die Berechnung der Verstärkung der Operationsschaltung	153
7.4.	Dynamisches Verhalten ausgewählter Operationsschaltungen	158
7.4.1.	Nichtinvertierender Verstärker	158
7.4.2.	Spannungsinverter	161
7.4.3.	Integrierer	162
7.4.4.	Gesteuerte Stromquelle	165
7.4.5.	Wirkung der Vorwärtsübertragung	166
7.5.	Zusammenfassung	170
8.	Statische und dynamische Fehler im Frequenzbereich	173
8.1.	Vektor-, Amplituden- und Phasenfehler	174
8.1.1.	Definition der Fehler	174
8.1.2.	Dynamische Fehler eines einpoligen Verzögerungsnetzwerkes 1. Ordnung	176
8.1.3.	Wirkung des statischen Fehlers	178
8.1.4.	Filter 2. Ordnung	179

8.2.	Statische Fehler	179
8.2.1.	Fehler infolge der Gleichspannungsverstärkung	180
8.2.2.	Fehler infolge der Gleichspannungsgleichtaktunterdrückung	180
8.2.3.	Fehler infolge des Gleichtakteingangswiderstandes	181
8.2.4.	Fehler durch das Rückkopplungsnetzwerk	182
8.2.5.	Kompensation statischer Fehler	185
8.3.	Dynamische Fehler	186
8.3.1.	Fehler infolge der Schleifenverstärkung	186
8.3.2.	Fehler infolge der Vorwärtsübertragung	190
8.3.3.	Fehler infolge der Gleichtakteingangskapazität	192
8.3.4.	Kompensation dynamischer Fehler	192
8.4.	Messung von Fehlern	197
8.4.1.	Messung statischer Fehler	197
8.4.2.	Messung dynamischer Fehler	197
8.5.	Zusammenfassung	199
9.	Dynamische Fehler im Zeitbereich	202
9.1.	Einschwingzeit der Operationsschaltung	202
9.1.1.	Exponentielle Sprungantwort	202
9.1.2.	Effekt der maximalen Slewrates	204
9.1.3.	Wirkung der Verstärkung der Operationsschaltung	207
9.2.	Frequenzpaar	208
9.2.1.	Qualitative Erklärung des langen Nachlaufs	208
9.2.2.	Lineare Analyse	213
9.2.3.	Optimale Lage des Frequenzpaares	216
9.3.	Summierpunktkapazität	218
9.3.1.	Einschwingen des Spannungsinverters	218
9.3.2.	Kompensation der Summierpunktkapazität	221
9.4.	Geschwindigkeitsfehler	222
9.4.1.	Geschwindigkeitsfehler eines nichtinvertierenden Verstärkers	223
9.4.2.	Geschwindigkeitsfehler eines Integrierers	224
9.5.	Messung der Einschwingzeit	225
9.6.	Zusammenfassung	228
10.	Eingangs- und Ausgangsimpedanzen	232
10.1.	Eingangsimpedanz der Operationsschaltung	232
10.1.1.	Blackmansche Impedanzbeziehung	232
10.1.2.	Definition der Eingangsimpedanz im Strommode und im Spannungsmode	234
10.1.3.	Beispiele für die Berechnung der Eingangsimpedanz	235
10.2.	Ausgangsimpedanz der Operationsschaltung	239
10.2.1.	Definition der Ausgangsimpedanz im Strommode und im Spannungsmode	239
10.2.2.	Beispiele für die Berechnung der Ausgangsimpedanz	240
10.3.	Zusammenfassung	241
11.	Offset	243
11.1.	Grundbeziehungen	243
11.1.1.	Ausgangs- und Eingangsfehler der Operationsschaltung	243

11.1.2.	Rauschverstärkung	245
11.1.3.	Vereinfachte Berechnung der Ausgangs- und Eingangsfehler	245
11.1.4.	Offset der Operationsschaltung	248
11.2.	Offset einfacher Operationsschaltungen	249
11.2.1.	Spannungsinverter	249
11.2.2.	Widerstandssymmetrierung der Operationsschaltung	252
11.2.3.	Wechselwirkung zwischen Verstärkung und Offset. Übersymmetrierter Inverter	255
11.2.4.	Summierverstärker	257
11.2.5.	I-U-Wandler	258
11.2.6.	Widerstands-T-Netzwerk	259
11.2.7.	Spannungsfolger	261
11.2.8.	Nichtinvertierender Verstärker	262
11.2.9.	Stromverstärker	263
11.2.10.	Differenzierer	264
11.2.11.	Sample/hold-Verstärker	265
11.2.12.	Integrierer	266
11.2.13.	Differenzverstärker	268
11.2.14.	Instrumentationsverstärker	269
11.2.15.	Logarithmischer Verstärker	270
11.3.	Offset infolge des Rückkopplungsnetzwerkes	272
11.3.1.	Thermoelektrische Spannungen	273
11.3.2.	Spannungsabfälle	275
11.3.3.	Leckströme	276
11.4.	Offsetabgleich der Operationsschaltung	279
11.4.1.	Abgleich der Spannungskomponente des Offsets	280
11.4.2.	Abgleich der Stromkomponente des Offsets	280
11.5.	Zusammenfassung	282
12.	Rauschen	284
12.1.	Rauschfilterung	284
12.1.1.	Rauschbandbreite	285
12.1.2.	Einpoliges Tiefpaßfilter	286
12.1.3.	Mehrfaches Tiefpaßfilter m-ter Ordnung	288
12.1.4.	Butterworth-Tiefpaßfilter m-ter Ordnung	288
12.1.5.	Einfaches Bandpaßfilter	289
12.1.6.	Filterung farbigen Rauschens	290
12.2.	Niederfrequenzrauschen einer Operationsschaltung	292
12.2.1.	Rauschen eines Spannungsfolgers	293
12.2.2.	Wirkung der Gleichtakteingangskapazität C_{cm}^+	297
12.2.3.	Theoretische Grenze der Rauschstrommessung	298
12.2.4.	Rauschen eines I-U-Wandlers	299
12.2.5.	Wirkung von Kapazitäten der Operationsschaltung	302
12.3.	Breitbandrauschen einer Operationsschaltung	303
12.3.1.	Rauschen eines Spannungsinverters	303
12.3.2.	Vergrößerung des Rauschens durch Resonanz	304
12.4.	Interferenzrauschen	306
12.5.	Zusammenfassung	308

13. Stabilität	310
13.1. Rückkopplungsstabilität	310
13.1.1. Absolute Stabilität und Nyquist-Stabilitätskriterium	311
13.1.2. Relative Stabilität. Phasensicherheit und Verstärkungssicherheit	313
13.1.3. Abgeleitete Kennwerte der relativen Stabilität. Resonanzüberhöhung und relatives Überschwingen	316
13.1.4. Operationsschaltung ν -ter Ordnung	319
13.1.5. Operationsschaltung 2. Ordnung	322
13.1.6. Kapazitive Ausgangslast	327
13.2. Frequenzkompensation der Operationsschaltung	330
13.2.1. Kompensation des Differenzierers	332
13.2.2. Kompensation kapazitiver Last	334
13.2.3. Kompensation der Summierpunktkapazität	337
13.2.4. Operationsschaltung mit Treiber	340
13.2.5. Kompensation des Operationsverstärkers	340
13.2.6. Abblockung der Betriebsspannungen	346
13.2.7. Praktische Stabilisierung einer Operationsschaltung	346
13.3. Zusammenfassung	347
14. Tafelanhang	349
Literatur	364
Sachwörterverzeichnis	368