

Inhaltsverzeichnis

1 Operationsverstärker: Kenndaten und Funktion	1
1.1 Lernziele	1
1.2 Schaltsymbol	1
1.3 Kenndaten	1
1.3.1 Kenndaten des idealen Operationsverstärkers	1
1.3.2 Kenndaten typischer Operationsverstärker	1
1.4 Funktionsbeschreibung	1
1.5 Übertragungskennlinie	2
1.6 Schaltsymbol, Aufbau und Kenndaten des 4fach-Operationsverstärkers LM324	3
1.7 Beispiele	3
1.8 Übung und Vertiefung	5
2 OP-Grundsaltungen mit Gegenkopplung	6
2.1 Der invertierende Verstärker	6
2.1.1 Lernziele	6
2.1.2 Eigenschaften von beschalteten Verstärkern	6
2.1.3 Die Funktionsweise des invertierenden Verstärkers	6
2.1.4 Beispiele zum invertierenden Verstärker	9
2.1.5 Übung und Vertiefung zum invertierenden Verstärker	11
2.2 Die Addierschaltung	13
2.2.1 Lernziele	13
2.2.2 Die Funktionsweise der Addierschaltung	13
2.2.3 Beispiele zum Addierer	14
2.2.4 Übungen und Vertiefung zum invertierenden Verstärker und Addierer	15
2.3 Die Konstantstromquelle	18
2.3.1 Lernziele	18
2.3.2 Die Funktionsweise der Konstantstromquelle	18
2.3.3 Beispiele zur Konstantstromquelle	19
2.3.4 Übungen und Vertiefung zur Konstantstromquelle	22
2.4 Der Differenzverstärker	24
2.4.1 Lernziele	24
2.4.2 Die Funktionsweise des Differenzverstärkers	24
2.4.3 Beispiele	26
2.4.4 Übung und Vertiefung	28
2.5 Der integrierende Verstärker	31
2.5.1 Lernziele	31
2.5.2 Grundsaltung des integrierenden Verstärkers	31
2.5.3 Strom- und Spannungsverläufe am Kondensator	31
2.5.4 Rechteckförmige Spannung am Integrator	32
2.5.5 Beispiel zum Integrator mit Konstantstromeinspeisung	33
2.5.6 Übungen und Vertiefung zum Integrator mit Konstantstromaufladung des Kondensators	34
2.5.7 Sinusförmige Spannung am Integrator	35
2.5.8 Darstellung des Frequenzganges im Bode-Diagramm	36

2.5.9 Beispiel zum Integrator an Sinusspannung	38
2.5.10 Übungen und Vertiefung zum Integrierer	38
2.6 Der Differenzierer	40
2.6.1 Lernziele	40
2.6.2 Die Funktionsweise des Differenzierers	40
2.6.3 Dreieckförmige Spannung am Differenzierer	40
2.6.4 Sinusförmige Spannung am Differenzierer	41
2.6.5 Beispiel zum Differenzierer an Sinusspannung	42
2.6.6 Übung und Vertiefung zum Differenzierer	42
2.7 Der nichtinvertierende Verstärker und der Impedanzwandler	44
2.7.1 Lernziele	44
2.7.2 Das Prinzip der Gegenkopplung beim nichtinvertierenden Verstärker	44
2.7.3 Funktionsweise und Berechnungsgrundlagen zum nichtinvertierenden Verstärker	46
2.7.4 Beispiele zum nichtinvertierenden Verstärker	47
2.7.5 Übungen und Vertiefung zum nichtinvertierenden Verstärker	50
3 Mitgekoppelte Schaltungen	53
3.1 Komparator ohne Hysterese	53
3.1.1 Lernziele	53
3.1.2 Funktionsweise	53
3.1.3 Beispiel zum Komparator ohne Hysterese	54
3.1.4 Übungen und Vertiefung zum Komparator ohne Hysterese	55
3.2 Nichtinvertierender Komparator mit Hysterese	56
3.2.1 Lernziele	56
3.2.2 Funktionsweise	56
3.2.3 Beispiele zum nichtinvertierenden Komparator	58
3.2.4 Übung und Vertiefung zum nichtinvertierenden Komparator	60
3.3 Invertierender Komparator mit Hysterese	63
3.3.1 Lernziele	63
3.3.2 Funktionsweise	63
3.3.3 Beispiel zum invertierenden Komparator	65
3.3.4 Übung und Vertiefung zum invertierenden Komparator	66
4 Vertiefungsübungen zu OP-Schaltungen	68
4.1 OP-Grundsaltungen	68
4.1.1 Mit- und gegengekoppelte Grundsaltungen	68
4.1.2 Zuordnung der Ausgangsspannung bei vorgegebenem Eingangssignal	69
4.2 Messschaltung zur Temperatur- und Helligkeitsanzeige	71
4.2.1 Funktionsbeschreibung zur Temperaturmessschaltung	71
4.2.2 Dimensionierungsgesichtspunkte	71
4.2.3 Funktionsbeschreibung zur Helligkeitsmessschaltung	72
4.2.4 Dimensionierungsgesichtspunkte	72
4.2.5 Beispiele	73
4.2.6 Übungen und Vertiefung	75
4.3 TTL-Logik-Tester mit Operationsverstärkern	77
4.3.1 Signalzustände von Logikgattern	77

4.3.2	Hinweise zum TTL-Logik-Tester	78
4.3.3	Funktionsweise des Logiktesters	78
4.3.4	Dimensionierung	79
4.3.5	Umrechnung auf eine andere Betriebsspannung	80
4.3.6	Der Überspannungsschutz	81
4.3.7	Übungen und Vertiefung	81
4.4	Universelle Messschaltung	83
4.4.1	Umwandlung des Logiktesters zur universellen Messschaltung	83
4.4.2	Übungen und Vertiefung	84
4.5	Analogverstärker-Schaltungen	85
4.5.1	Die Konzeption von Rechenverstärkern	85
4.5.2	Der Eingangswiderstand eines Rechenverstärkers	85
4.5.3	Die Beeinflussung des Ausgangssignales durch eine Last	86
4.5.4	Beispiele zu Rechenverstärkerschaltungen	88
4.5.5	Übungen und Vertiefung	92
4.6	Digital-Analog-Umsetzer und Analog-Digital-Umsetzer	99
4.6.1	DA-Prinzip	99
4.6.2	Beispiel zum DA-Summierverstärker	101
4.6.3	Übung und Vertiefung zum Summierverstärker als DA-Wandler	101
4.6.4	DA-Wandler-Prinzip mit R-2R-Netzwerk	103
4.6.5	Beispiel zum R-2R-Netzwerk	103
4.6.6	Übungen und Vertiefung	104
4.6.7	AD-Prinzip im Flash-Wandler	105
4.6.8	Beispiel zum Flash-AD-Wandler	108
4.6.9	Übung und Vertiefung	108
4.7	Funktionsgeneratoren mit Anwendungsbeispielen	109
4.7.1	Rechteck-Dreieck-Generator	109
4.7.1.1	Funktionsweise eines Standard-Rechteck-Dreieck-Generators	109
4.7.1.2	Berechnungsgrundlagen	109
4.7.2	Pulsweitenmodulation	112
4.7.2.1	Pulsweitenmodulation mit Rechteck-Dreieck-Generator	112
4.7.2.2	Übung und Vertiefung	113
4.7.3	Leistungs-PWM	115
4.7.3.1	Technische Daten	115
4.7.3.2	Funktionsbeschreibung	115
4.7.3.3	Berechnungsgrundlagen	115
4.7.3.4	Übung und Vertiefung	118
4.7.4	PWM mit standardisiertem astabilen Multivibrator	119
4.7.4.1	Vorbetrachtungen zur Berechnung des Standard-Multivibrators	119
4.7.4.2	Berechnungen zum astabilen Multivibrator mit Pulsweitenmodulation ..	122
4.7.4.3	Astabiler Multivibrator mit PWM und unipolarer Spannungsversorgung	123
4.7.4.4	Übung und Vertiefung	126
4.8	Triggerschaltungen	127
4.8.1	Netzsynchroner Sägezahngenerator	127
4.8.1.1	Funktionsbeschreibung	127
4.8.1.2	Dreieck-Sägezahnspannungsumwandlung	128

4.8.1.3	Berechnungsgrundlagen	129
4.8.1.4	Übung und Vertiefung	130
4.8.2	Komparator-Schaltung: Einstellbarer Trigger	131
4.8.2.1	Funktionsweise	131
4.8.2.2	Übung und Vertiefung	131
5	OP-Anwendungen in Stromversorgungsgeräten	132
5.1	Konventionelle Netzgeräte mit Serienstabilisierung	132
5.1.1	Die Funktionsweise der Serienstabilisierung nach regelungstechnischen Gesichtspunkten	132
5.1.2	Aufbau und Wirkungsweise eines serienstabilisierten Netzgerätes	133
5.1.3	Berechnungsgrundlagen	133
5.1.4	Vor- und Nachteile der analogen Serienstabilisierung	134
5.1.5	Beispiel zu einem Stromversorgungsgerät mit Serienstabilisierung	134
5.1.6	Übung und Vertiefung	135
5.2	Stromversorgungsgerät mit symmetrisch-bipolarer Ausgangsspannung	137
5.2.1	Funktionsweise und Dimensionierungsgesichtspunkte	137
5.2.2	Übung und Vertiefung zum Netzteil mit bipolarer Spannungsversorgung	140
5.3	Standard-Stromversorgungsgeräte mit Operationsverstärkern	141
5.3.1	Aufbau der Standard-Schaltung	141
5.3.2	Die dynamischen Eigenschaften des Standard-Netzteiles	142
5.3.3	Übungen und Vertiefung	149
5.4	Sekundär getaktete Netzgeräte mit freilaufender Schaltfrequenz	152
5.4.1	Die Funktionsweise sekundär getakteter Netzgeräte mit freilaufender Taktfrequenz	152
5.4.2	Funktionsweise und Realisierung eines Sekundär-Schaltnetzteiles mit freilaufender Schaltfrequenz	153
5.4.3	Übung und Vertiefung zum freilaufenden Schaltnetzteil	157
5.5	Sekundär-Schaltnetzteil mit fester Schaltfrequenz	159
5.5.1	Sekundär getaktetes Stromversorgungsgerät mit fester Schaltfrequenz	159
5.5.2	Der Schaltregler L4960 und seine Beschaltung	159
5.5.3	Beispiele zum Sekundär-Schaltregler	163
5.5.4	Übung und Vertiefung	165
5.6	Primär getaktete Stromversorgungsgeräte	166
5.6.1	Die Funktionsweise eines primär geschalteten Stromversorgungsgeräts	166
5.6.2	Beispiel zum primär getakteten Schaltnetzteil	167
5.6.3	Übung und Vertiefung zu primär getakteten Netzteilen	170
6	Übertragungsverfahren nach dem Frequency-Shift-Keying-Prinzip	172
6.1	Allgemeines zum Frequency-Shift-Keying-Verfahren	172
6.2	Blockschaltbild und Funktionsweise des FSK-Empfängers	172
6.3	Funktionsbeschreibung zur Frequenzauswerteschaltung	174
6.3.1	Operationsverstärker V_1 - Vorverstärker	174
6.3.2	Operationsverstärker V_2 und V_3 - Aktive Bandfilter	174
6.3.3	Berechnungsbeispiel für ein aktives Bandfilter	177

6.3.4 Die Demodulation	180
6.3.5 Signalaufbereitung des demodulierten Signales	182
6.4 Aktive Filter mit Operationsverstärkern	184
6.4.1 Das Tiefpassfilter	184
6.4.2 Das Bandfilter	186
6.5 Übung und Vertiefung zur Frequenzauswerteschaltung	188
6.6 Frequenzumtastung	191
6.7 Berechnungsgrundlagen	191
6.8 Übung und Vertiefung	195
7 Kenndaten und Anwendungshinweise zum realen OP	196
7.1 Kenndaten zum Operationsverstärker	196
7.1.1 Die wichtigen Kenngrößen des Operationsverstärkers	196
7.1.2 Tabellarische Übersicht über die wichtigen Kenngrößen	196
7.1.3 Kenndaten des Operationsverstärkers $\mu A741$	198
7.2 Verstärkung und Zeitverhalten	206
7.2.1 Frequenzgang des Operationsverstärkers	206
7.2.2 Die Slewrate oder Anstiegsflanke	209
7.2.3 Beeinflussung des Frequenzganges durch Gegenkopplungsbeschaltung	212
7.2.4 Übung und Vertiefung	215
7.3 Stabilitätskriterien von beschalteten Operationsverstärkern	217
7.3.1 Stabilitätskriterien nach dem Bode-Diagramm	217
7.3.2 Stabilitätskriterien zum Phasen- und Amplitudengang	219
7.3.3 Stabilitätskriterien zum invertierenden Verstärker und Differenzierer	220
7.3.4 Übung und Vertiefung	224
7.4 Eingangsgrößen	225
7.4.1 Eingangsgrößen und ihre Offsets	225
7.4.2 Übliche Maßnahmen zur Offsetspannungskompensation	228
7.4.3 Die Offsetkompensation am integrierenden Verstärker	230
7.5 Rail-to-Rail-Operationsverstärker	233
7.5.1 Die Rail-to-Rail-Konzeption	233
7.5.2 Ausgangsstufen von Standard-Operationsverstärkern	233
7.5.3 Ausgangsstufen von Rail-to-Rail-Operationsverstärkern	234
7.5.4 Anwendungsbeispiele zu einem Rail-to-Rail-OP	235
7.5.4.1 Schaltsymbol, Gehäuse und Kenndaten	236
7.5.4.2 Messtechnische Bestimmung der Transitfrequenz	237
7.5.4.3 Die Aussteuergrenzen	242
7.5.4.4 Invertierender NF-Verstärker unipolarer Spannungsversorgung	244
7.5.4.5 Standard-Vorverstärker mit unipolarer Spannungsversorgung	248
7.5.5 Übung und Vertiefung	250
8 Die Austauschbarkeit von Komparator- und OP-ICs untereinander	251
8.1 Problemstellung	251
8.2 Der Standard-Komparator LM339	251
8.3 Standard-Komparator-Schaltung mit Komparator-ICs und OP-ICs	252
8.4 Komparatoren mit Hysterese	253
8.4.1 Nichtinvertierender Komparator mit Hysterese	253

8.4.2 Invertierender Komparator mit Hysterese	255
8.5 Typische Komparator-Anwendungen mit Komparatoren und OPs	256
8.5.1 Vorteile des Open-Collector-Ausgangs bei Komparatoren	256
8.5.2 Signalzustandsanzeigen von Komparatoren-Schaltungen	256
8.6 Komparatoren als analoge Verstärker	258
8.6.1 Der nichtinvertierende Verstärker	258
8.6.2 Der invertierende Analogverstärker	262
8.7 Grundsätzliches zur Austauschbarkeit von OPs und Komparatoren	263
8.8 Übung und Vertiefung zum Komparator LM339	264
9 Schaltungssimulation mit dem PC	267
9.1 Die Vorteile in der Anwendung von Simulationsprogrammen	267
9.2 Der preiswerte Zugang zu Simulationsprogrammen	267
9.3 Kurzbeschreibung zum Programm LTspice IV / SWCADIII	268
9.3.1 Installation	268
9.3.2 Kurzanleitung zum Programm	268
9.4 Umfangreichere und komplexere Schaltungen in LTspice IV / SWCADIII	273
9.4.1 Die Frequenzauswerteschaltung aus Kapitel 6	274
9.4.2 Grundsätzliches zur Programmierung	275
9.5 Empfehlung	276
Lösungsanhang	277
Informative Internetadressen zum Themenbereich des Operationsverstärkers	338
Sachwortverzeichnis	339