

Elektronik 3

Klaus Beuth / Wolfgang Schmusch

Grundsaltungen

17., überarbeitete Auflage

unter Mitwirkung von Olaf Beuth

Vogel Buchverlag

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	5
1 Das Oszilloskop als vielseitiges Messgerät	15
1.1 Kenndaten eines Oszilloskops	15
1.1.1 Empfindlichkeit – Ablenkkoeffizient	15
1.1.2 Anstiegszeit	16
1.1.3 Bandbreite	17
1.1.3.1 Y-Verstärker	17
1.1.3.2 Zeitbasis	18
1.1.3.3 X-Verstärker	18
1.1.4 Eingangswiderstand	19
1.1.5 Eingangskapazität	19
1.2 Tastköpfe	19
1.2.1 Einsatzmöglichkeiten und Vorteile von Tastköpfen	20
1.2.1.1 1 : 1-Tastkopf	20
1.2.1.2 10 : 1-Tastkopf	21
1.2.1.3 Gleichrichter-Tastkopf	22
1.2.2 Abgleich von Tastköpfen	23
1.3 Ausführungsformen von Oszilloskopen	24
1.3.1 Zweistrahloszilloskop	24
1.3.2 Zweikanaloszilloskop	24
1.3.3 Speicheroszilloskop	25
1.3.3.1 Analog-Speicheroszilloskop	26
1.3.3.2 Digitalspeicheroszilloskop	27
1.4 Einsatzmöglichkeiten des Oszilloskops	32
1.4.1 Darstellung und Messung von periodischen Spannungen	33
1.4.2 Darstellung und Messung von einmaligen Spannungssprüngen	33
1.4.3 Frequenzmessung und Phasenmessung	34
1.4.3.1 Verwendung der Zeitbasis	34
1.4.3.2 Auswertung der Lissajous-Figuren	35
1.4.4 Darstellung einer Kennlinie	37
1.4.5 Wobbein eines Filters	37
2 Gleichrichterschaltungen	41
2.1 Allgemeines	41
2.2 Netzgleichrichterschaltungen	41
2.2.1 Grundsaltungen	41
2.2.2 Gleichrichterschaltungen mit ohmscher Belastung	43
2.2.2.1 Einweg-Gleichrichterschaltung (Einpuls-Mittelpunktschaltung M1)	43
2.2.2.2 Brücken-Gleichrichterschaltung (Zweipuls-Brückenschaltung B2)	45

	2.2.2.3	Mittelpunkt-Zweiweg-Gleichrichterschaltung (Zweipuls-Mittelpunktschaltung M2)	47
	2.2.3	Gleichrichterschaltungen mit kapazitiver Belastung	49
	2.2.4	Gleichrichterschaltungen mit induktiver Belastung	52
2.3		Siebschaltungen	54
	2.3.1	Ladekondensator	54
	2.3.2	Siebglieder	55
	2.3.2.1	RC-Siebglieder	56
	2.3.2.2	LC-Siebglieder	58
2.4		Dimensionierung von Netzgleichrichterschaltungen	60
2.5		Spannungsverdopplerschaltungen	63
	2.5.1	Delon-Schaltung (Zweipuls-Verdopplerschaltung D2)	63
	2.5.2	Villard-Schaltung (Einpuls-Verdopplerschaltung D1)	64
2.6		Spannungsvervielfacher-Schaltungen	66
2.7		Schaltnetzteile	68
	2.7.1	Schaltnetzteil-Prinzip	68
	2.7.2	Primärgetaktete Schaltnetzteile	69
	2.7.2.1	Durchflusswandler	70
	2.7.2.2	Sperrwandler	71
	2.7.3	Sekundärgetaktete Schaltnetzteile	72
	2.7.4	Schaltnetzteil mit Gegentaktflusswandler	73
2.8		Kondensatornetzteile	74
3		Verstärkerschaltungen	77
	3.1	Grundschialtung des Transistors	77
	3.2	Ersatzschaltung des Transistors bei Kleinsignalaussteuerung	78
	3.2.1	Der differentielle Eingangswiderstand r_{BF} (Vierpolparameter h_{Ue})	78
	3.2.2	Differentieller Ausgangswiderstand r_{CE} (Vierpolparameter $V_{h_{Ue}}$)	79
	3.2.3	Rückwirkung	80
	3.2.4	Eingangs- und Ausgangskapazität	81
	3.2.5	Ersatzschaltbild nach GIACOLETTO	81
	3.2.6	\wedge -Parameter-Ersatzschaltbild	82
	3.3	Emitterschaltung	83
	3.3.1	Arbeitspunkteinstellung	84
	3.3.1.1	Arbeitspunkteinstellung mit Spannungsteiler . . .	85
	3.3.1.2	Arbeitspunkteinstellung mit Vorwiderstand	86
	3.3.2	Arbeitspunktstabilisierung	87
	3.3.2.1	Stabilisierung durch Temperaturkompensation . .	88
	3.3.2.2	Stabilisierung durch Gegenkopplung	88
	3.3.3	Kleinsignalverhalten der Emitterschaltung	93
	3.3.3.1	Verstärkung der Emitterschaltung	93
	3.3.3.2	Eingangs- und Ausgangswiderstand	96
	3.3.3.3	Ankopplung des Verbraucherwiderstandes	98
	3.3.3.4	Berechnung einer Emitterschaltung	100
	3.3.4	Kleinsignalverhalten der Emitterschaltung mit Strom- und Spannungsgegenkopplung	103

3.3.4.1	Stromgegenkopplung	104
3.3.4.2	Spannungsgegenkopplung	107
3.3.5	Anwendung der Emitterschaltung	109
3.4	Kollektorschaltung (Emitterfolger)	109
3.4.1	Arbeitspunkteinstellung	109
3.4.2	Kleinsignalverhalten der Kollektorschaltung	111
3.4.2.1	Verstärkung	111
3.4.2.2	Eingangs- und Ausgangswiderstand	113
3.4.3	Kollektorschaltung als Impedanzwandler	115
3.4.4	Bootstrap-Schaltung	116
3.4.5	Darlington-Schaltung	116
3.5	Basisschaltung	118
3.5.1	Arbeitspunkteinstellung	118
3.5.2	Kleinsignalverhalten der Basisschaltung	118
3.5.2.1	Eingangs- und Ausgangswiderstand	119
3.5.2.2	Verstärkung	120
3.6	Wechselspannungsverstärker	123
3.6.1	Kenngrößen des Wechselspannungsverstärkers	123
3.6.1.1	Verstärkung	123
3.6.1.2	Spannungsfrequenzgang	124
3.6.1.3	Phasenverschiebung	127
3.6.1.4	Signalverzerrungen – Klirrfaktor	127
3.6.1.5	Störspannungen	128
3.6.2	Mehrstufige Verstärker	130
3.6.2.1	Verstärkung und Bandbreite	130
3.6.2.2	Kopplung mehrstufiger Verstärker	132
3.6.3	Breitbandverstärker	134
3.6.3.1	Untere Grenzfrequenz f_{gu}	135
3.6.3.2	Obere Grenzfrequenz	138
3.6.3.3	Erhöhung der Bandbreite durch Gegenkopplung	140
3.6.4	Nf-Vorverstärker	142
3.6.4.1	Anforderungen	142
3.6.4.2	Schaltungsbeispiele mit bipolaren Transistoren	143
3.6.4.3	Schaltungsbeispiele mit Feldeffekt-Transistoren	146
3.6.5	Nf-Leistungsverstärker	148
3.6.5.1	Anforderungen	148
3.6.5.2	Verstärkerarten	149
3.6.5.3	Kollektorschaltung als Leistungsverstärker im A-Betrieb	152
3.6.5.4	Kollektorschaltung im Gegentaktbetrieb	153
3.7	Gleichspannungsverstärker	158
3.7.1	Anforderungen	158
3.7.2	Differenzverstärker	159
3.7.2.1	Grundsaltung des Differenzverstärkers	159
3.7.2.2	Asymmetrischer Ausgang	162
3.7.2.3	Anwendungen des Differenzverstärkers	166
3.8	Operationsverstärker	167

3.8.1	Betriebsarten des Operationsverstärkers	168
3.8.2	Kenngrößen des Operationsverstärkers	168
3.8.2.1	Ruhegleichstrom – Stromoffset	169
3.8.2.2	Eingangs- und Ausgangswiderstände	171
3.8.2.3	Frequenzgang der Leerlaufverstärkung	173
3.8.2.4	Spannungsoffset	175
3.8.2.5	Gleichtaktverstärkung und Gleichtaktunterdrückung	177
3.8.2.6	Zusammenfassung der Eingangsspannungen	180
3.8.2.7	Aussteuerbereich des OPV	181
3.8.2.8	Maximale Anstiegsgeschwindigkeit	182
3.8.2.9	Zusammenstellen von Datenblattwerten	182
3.8.3	Grundsaltungen der Gegenkopplung	183
3.8.3.1	Gegenkopplungsarten des OPV	183
3.8.3.2	Wirkungsweise der Gegenkopplung	185
3.8.3.3	Schleifenverstärkung – Grenzen der Gegenkopplung	188
3.8.3.4	Linearität, Bandbreite und Phasenverschiebung des gegengekoppelten Verstärkers	189
3.8.3.5	Stabilität des gegengekoppelten Verstärkers	192
3.8.4	Ausgewählte gegengekoppelte Schaltungen	192
3.8.4.1	Nichtinvertierender Verstärker (Elektrometerverstärker)	193
3.8.4.2	Invertierender Verstärker	196
3.8.4.3	Summierverstärker	200
3.8.4.4	Subtrahierverstärker – Differenzverstärker	201
3.8.4.5	Umschalten von invertierendem Betrieb auf nichtinvertierenden Betrieb	203
3.8.4.6	Filterschaltungen	203
3.8.4.7	Integrierverstärker	210
3.8.4.8	Stromquellen und Stromverstärker	213
3.8.4.9	Prinzip des Regelverstärkers	215
3.8.4.10	Instrumentierungsverstärker	216
3.8.4.11	Transimpedanzverstärker	217

Schaltungen zur Stabilisierung von Spannungen und Strömen		223
4.1	Einführung	223
4.2	Konstantspannungsquelle	223
4.3	Konstantstromquelle	226
4.4	Stabilisierung	226
4.4.1	Spannungsstabilisierung	227
4.4.1.1	Kenngrößen der Stabilisierung	227
4.4.1.2	Parallelstabilisierung	228
4.4.1.3	Serienstabilisierung	236
4.4.2	Stromstabilisierung	248
4.4.2.1	Transistoren als Stromquelle	248
4.4.2.2	Stromquelle mit Operationsverstärker	250
4.4.2.3	Stromquelle für höhere Ströme	250

4.4.3	Strombegrenzung	252
4.4.3.1	Überstromsicherung	253
4.4.3.2	Strombegrenzung durch Widerstand	254
4.4.3.3	Stromregelung	257
4.4.4	Spannungsstabilisierung mit Schaltregler	262
4.4.4.1	Prinzip eines Schaltreglers mit Speicherdrossel (Durchflusswandler)	263
4.4.4.2	Schaltregler nach dem Sperrwandlerprinzip . . .	270
4.4.4.3	Regelung des Tastverhältnisses	275
4.4.4.4	Integrierte Festspannungsregler	280
5	Transistor-Schalterstufen	285
5.1	Allgemeines	285
5.2	Betriebsarten	286
5.2.1	Nichtübersteuerter Betrieb	286
5.2.2	Übersteuerter Betrieb	288
5.3	Schaltvorgänge und Schaltzeiten	290
5.3.1	Schalten in den Durchlasszustand	290
5.3.2	Schalten in den Sperrzustand	292
5.3.3	Beeinflussung der Schaltzeiten	294
5.4	Schalten bei verschiedenartiger Belastung	295
5.4.1	Schalten bei ohmscher Belastung	295
5.4.2	Schalten bei kapazitiver Belastung	296
5.4.3	Schalten bei induktiver Belastung	298
5.4.4	Schalten von Heiß- und Kaltleitern	300
5.5	Belastbarkeit	301
5.5.1	Höchstzulässige Verlustleistung	301
5.5.2	Mittlere Verlustleistung	303
5.5.3	Impulsverlustleistung	307
5.6	Mehrstufige Transistorschalter	310
6	Schaltungen mit Mehrschichtdioden, Diac und Triac	313
6.1	Vierschichtdiode als elektronischer Schalter	313
6.2	Thyristor als elektronischer Schalter	314
6.2.1	Zündschaltungen	314
6.2.1.1	Allgemeines	314
6.2.1.2	Phasenanschnittsteuerung	317
6.2.1.3	Vollwellensteuerung (Wellenpaketsteuerung) . . .	322
6.2.2	Anwendungen des Thyristors	323
6.2.2.1	Vollweg-Leistungssteuerung	323
6.2.2.2	Einstellbarer Gleichrichter	324
6.2.2.3	Vollwellenschaltung	324
6.3	Diac und Triac als elektronische Schalter	325
6.3.1	Phasenanschnittsteuerung	325
7	Kippschaltungen	327
7.1	Bistabile Kippstufe	327
7.1.1	Arbeitsweise	327

7.1.2	Ansteuerungsarten	330
7.1.3	Bistabile Kippstufen mit besonderen Eigenschaften	333
7.1.4	Anwendungsbeispiele	334
7.1.4.1	Bistabile Kippstufe als Frequenzteiler	334
7.1.4.2	Bistabile Kippstufe als Signalspeicher	335
7.1.5	Bemessung bistabiler Kippstufen	336
7.2	Monostabile Kippstufe	338
7.2.1	Arbeitsweise	338
7.2.2	Monostabile Kippstufe mit Schutzdiode	341
7.2.3	Ansteuerungsarten	341
7.2.4	Anwendungsbeispiele	343
7.2.4.1	Schaltung zur Impulsverlängerung	343
7.2.4.2	Schaltung zur Impulsregenerierung	343
7.2.5	Schaltzeichen	345
7.2.6	Bemessung monostabiler Kippstufen	345
7.3	Astabile Kippschaltung (Multivibrator)	347
7.3.1	Arbeitsweise	348
7.3.2	Schaltungsaufbau und Impuls-Pausen-Verhältnis	350
7.3.3	Bemessung von astabilen Kippschaltungen	353
7.3.4	Anwendungsbeispiele	356
7.3.4.1	Impulsgeber	356
7.3.4.2	Rechteckgenerator	357
7.3.4.3	Einfache Blinkschaltung	357
7.3.5	Synchronisierte astabile Kippschaltung	357
7.3.6	Schaltzeichen	358
7.4	Kippschaltungen mit Operationsverstärker	359
7.4.1	Bistabile Kippstufe	359
7.4.2	Monostabile Kippstufe	359
7.4.3	Astabile Kippstufe	360
8	Generatorschaltungen	361
8.1	Prinzip einer Generatorschaltung	361
8.1.1	Allgemeine Schwingbedingungen	363
8.2	Erzeugung rechteckförmiger Spannungen	364
8.3	Erzeugung von sägezahnförmigen Spannungen	365
8.3.1	Sägezahngenerator mit Stromquelle	367
8.3.2	Miller-Integrator	368
8.3.3	Sperrschwinger	373
8.3.4	Synchronisierung eines Sägezahngenerators	374
8.4	Erzeugung sinusförmiger Spannungen	376
8.4.1	LC-Generatoren	377
8.4.1.1	Meißner-Oszillator	377
8.4.1.2	Induktive Dreipunktschaltung (Hartley-Oszillator)	378
8.4.1.3	Kapazitive Dreipunktschaltung (Colpitts-Oszillator)	379
8.4.2	Quarzgeneratoren	381
8.4.3	RC-Generatoren	384

	8.4.3.1	Phasenschiebergenerator	385
	8.4.3.2	Wien-Robinson-Generator	386
9		Impulsformerschaltungen	389
	9.1	Zeitfunktionen von Strom und Spannung	389
	9.2	Begrenzerschaltungen	391
	9.2.1	Begrenzerschaltungen mit Dioden	391
	9.2.2	Begrenzerschaltungen mit Transistoren	395
	9.3	Integrierglied	396
	9.3.1	Arbeitsweise des RC-Gliedes	"396
	9.3.2	Mathematische und elektrische Integration	398
	9.4	Differenzierglied	399
	9.4.1	Arbeitsweise des CR-Gliedes	399
	9.4.2	Mathematische und elektrische Differentiation	402
	9.5	Schmitt-Trigger	404
	9.5.1	Arbeitsweise	404
	9.5.2	Bemessung eines Schmitt-Triggers	406
	9.5.3	Anwendungsbeispiele	409
		9.5.3.1 Schwellwertschalter	409
		9.5.3.2 Sinus-Rechteck-Spannungswandler	411
	9.5.4	Schaltzeichen	412
10		Grundlagen der Regelungstechnik	415
	10.1	Allgemeines	415
	10.1.1	Begriffe der Regelungstechnik	416
	10.1.2	Darstellung des Regelkreises	417
	10.2	Zeitverhalten der Regelkreisglieder	420
	10.2.1	Unstetige Regeleinrichtungen	420
	10.2.2	Stetige Regeleinrichtungen	422
		10.2.2.1 Proportionale Regeleinrichtung (P-Regelung) . . .	422
		10.2.2.2 Integrierende Regeleinrichtung (I-Regelung) . . .	425
		10.2.2.3 PI-Regeleinrichtung	427
		10.2.2.4 D-Regeleinrichtung	428
		10.2.2.5 PD-Regeleinrichtung	429
		10.2.2.6 PID-Regeleinrichtung	430
	10.3	Beispiele für einfache Regelkreise	430
	10.3.1	Temperaturregelung	430
	10.3.2	Drehzahlregelung von Kleinmotoren	433
11		Einführung in die Digitaltechnik	435
	11.1	Grundbegriffe	435
	11.1.1	Analoge und digitale Signale	435
	11.1.2	Logische Zustände «0» und «1»	437
	11.2	Logische Verknüpfungen	438
	11.2.1	UND-Verknüpfung	438
	11.2.2	ODER-Verknüpfung	441
	11.2.3	Verneinung	443
	11.2.4	NAND-Verknüpfung	444

11.2.5	NOR-Verknüpfung	445
11.3	Schaltungen logischer Glieder	447
11.3.1	Schaltungen in Relais-Technik	447
11.3.2	Schaltungen in DTL-Technik	448
11.3.3	Schaltungen in TTL-Technik	450
11.3.4	Schaltungen in MOS-Technik	451
11.4	Pegelangaben «Low» und «High»	453
11.4.1	Allgemeines	453
11.4.2	Positive Logik	454
11.4.3	Negative Logik	455
11.5	Schaltungsanalyse	456
11.5.1	Allgemeines	456
11.5.2	Soll-Verknüpfung	457
11.5.3	Ist-Verknüpfung	459
11.6	Schaltalgebra	459
11.6.1	Grundlagen	459
11.6.2	Bestimmung der Funktionsgleichung einer Schaltung	460
11.6.3	Darstellung der Schaltung nach der Funktionsgleichung	462
11.6.4	Funktionsgleichung und Kontaktschema	462
11.6.5	Nutzungsmöglichkeiten der Schaltalgebra	463
11.7	Schaltungssynthese	464
12	Digitale Codes und digitale Zähl- und Speichertechnik	467
12.1	Darstellung von Ziffern und Zahlen	467
12.1.1	Duales Zahlensystem	467
12.1.2	BCD-Code (8-4-2-1-Code)	469
12.1.3	Weitere Binär-Codes	471
12.2	Schaltungen zum Codieren und Decodieren	472
12.2.1	Umsetzen von Dezimalziffern in Dualzahlen	472
12.2.2	Umsetzen von Dualzahlen in Dezimalziffern	473
12.3	Rechnen mit Dualzahlen	474
12.3.1	Umwandlung von Zahlen	474
12.3.2	Addition von Dualzahlen	477
12.3.3	Subtraktion von Dualzahlen	479
12.4	Speichern und Verschieben digitaler Signale	480
12.4.1	Flipflop-Arten	480
12.4.2	Schieberegister	486
12.4.3	Flipflop-Speicher	492
12.5	Zählerschaltungen	494
12.5.1	Frequenzteiler	494
12.5.2	Vorwärtszähler	496
12.5.3	Rückwärtszähler	499
12.5.4	Zähldekaden	499