

Elektronik 2

Klaus Beuth

Bauelemente

19., überarbeitete und erweiterte Auflage

unter Mitarbeit von Olaf Beuth

Vogel Buchverlag

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	5
1 Einführung in die Oszillographenmesstechnik	15
1.1 Allgemeines	15
1.2 Aufbau und Arbeitsweise eines Oszilloskops	16
1.3 Bedienung eines Oszilloskops	21
1.4 Lernziel-Test	22
2 Lineare und nichtlineare Widerstände	23
2.1 Allgemeine Eigenschaften	23
2.2 Festwiderstände	25
2.2.1 Eigenschaften von Festwiderständen	25
2.2.2 Bauarten von Festwiderständen	29
2.2.2.1 Schichtwiderstände	29
2.2.2.2 Widerstände in der Mikromodultechnik	30
2.2.2.3 Drahtwiderstände	31
2.3 Einstellbare Widerstände	32
2.3.1 Einstellbare Schichtwiderstände	34
2.3.2 Einstellbare Drahtwiderstände	35
2.4 Temperaturabhängigkeit von Widerständen	36
2.5 Heileiterwiderstnde und Kaltleiterwiderstnde	37
2.5.1 Heileiterwiderstnde	37
2.5.1.1 Aufbau und Arbeitsweise	37
2.5.1.2 Kennwerte und Grenzwerte	38
2.5.1.3 Anwendungen	38
2.5.2 Kaltleiterwiderstnde	39
2.5.2.1 Aufbau und Arbeitsweise	39
2.5.2.2 Kennwerte und Grenzwerte (siehe auch Bild 2.25)	40
2.5.2.3 Anwendungen	40
2.6 Spannungsabhngige Widerstnde	41
2.6.1 Aufbau und Arbeitsweise	41
2.6.2 Kennwerte und Grenzwerte	42
2.6.3 Anwendungen	44
2.7 Lernziel-Test	45
3 Kondensatoren und Spulen	47
3.1 Kapazitt	47
3.2 Kondensatoren	49
3.2.1 Allgemeines	49
3.2.2 Bauarten von Kondensatoren	52
3.2.2.1 Papierkondensatoren, Kunststoffkondensatoren (Folienkondensatoren)	52
3.2.2.2 Metall-Papier-Kondensatoren (MP-Kondensatoren)	53
3.2.2.3 Metall-Kunststoff-Kondensatoren (MK-Kondensatoren)	53
3.2.2.4 Keramikkondensatoren	54
3.2.2.5 Elektrolytkondensatoren	54

3.2.2.6	Einstellbare Kondensatoren	57
3.3	Kondensator im Gleichstromkreis	58
3.3.1	Kondensatorladung	58
3.3.2	Kondensatorenergie	60
3.3.3	Kondensatorentladung	60
3.4	Kondensator im Wechselstromkreis	60
3.4.1	Durchlass von Wechselstromschwingungen	60
3.4.2	Kapazitiver Blindwiderstand	61
3.4.3	Phasenverschiebung und Zeigerdiagramm	62
3.4.4	Verlustfaktor und Verlustwinkel	62
3.5	Reihen- und Parallelschaltung von Kondensatoren	63
3.5.1	Reihenschaltung	63
3.5.2	Parallelschaltung	64
3.6	Spulen	65
3.6.1	Induktivität	65
3.6.2	Bauarten von Spulen	66
3.6.2.1	Luftspulen	66
3.6.2.2	Eisenkernspulen	67
3.7	Spule im Gleichstromkreis	68
3.7.1	Magnetfeldaufbau (Einschaltvorgang)	68
3.7.2	Spulenergie	69
3.7.3	Magnetfeldabbau (Ausschaltvorgang)	70
3.8	Spule im Wechselstromkreis	71
3.8.1	Auf- und Abbau des Magnetfeldes	71
3.8.2	Phasenverschiebung und Zeigerdiagramm	71
3.8.3	Induktiver Blindwiderstand	72
3.8.4	Verlustfaktor und Güte	73
3.8.5	Wickeln von Spulen	73
3.9	Reihen- und Parallelschaltung von Spulen	75
3.9.1	Reihenschaltung	75
3.9.2	Parallelschaltung	76
3.10	Lernziel-Test	77
4	Frequenzabhängige Zwei- und Vierpole	79
4.1	Allgemeines	79
4.1.1	Zweipole	79
4.1.2	Vierpole	79
4.2	Reihenschaltung von R und C	79
4.3	Reihenschaltung von R und L	80
4.4	RC-Glied	81
4.5	CR-Glied	83
4.6	RL-Glied	85
4.7	LR-Glied	86
4.8	Schwingkreise	87
4.8.1	Reihenschaltung von R , L und C	87
4.8.2	Reihenschwingkreise	88
4.8.3	Parallelschaltung von R , L und C	91
4.8.4	Parallelschwingkreise	93
4.9	RC-Glied als Integrierglied	97
4.9.1	Arbeitsweise	97
4.9.2	Integrationsvorgang	98
4.9.3	Einfluss des speisenden Generators	98

4.10	CR-Glied als Differenzierglied	99
4.10.1	Arbeitsweise	99
4.10.2	Differentiationsvorgang	99
4.10.3	Einfluss des speisenden Generators	100
4.11	Lernziel-Test	101
5	Halbleiterdioden	103
5.1	Halbleiterwerkstoffe	103
5.2	Aufbau eines Halbleiterkristalls	104
5.3	Eigenleitfähigkeit	105
5.4	n-Silizium	106
5.5	p-Silizium	107
5.6	pn-Übergang	109
5.6.1	pn-Übergang ohne äußere Spannung	109
5.6.2	pn-Übergang mit äußerer Spannung	112
5.7	Arbeitsweise von Halbleiterdioden	115
5.7.1	Einkristall-Halbleiterdioden	115
5.7.2	Vielkristall-Halbleiterdioden	120
5.8	Schaltverhalten von Halbleiterdioden	121
5.9	Temperaturverhalten von Halbleiterdioden	122
5.10	Halbleiterdioden als Gleichrichter	123
5.10.1	Einweg-Gleichrichterschaltung (Einpuls-Mittelpunktschaltung M 1)	123
5.10.2	Mittelpunkts-Zweiweg-Gleichrichterschaltung (Zweipuls-Mittelpunktschaltung M 2)	126
5.10.3	Brücken-Zweiweg-Gleichrichterschaltung (Zweipuls-Brückenschaltung B 2)	127
5.11	Halbleiterdioden als Schalter	128
5.12	Bauarten von Halbleiterdioden	129
5.12.1	Flächendioden	130
5.12.2	Spitzendioden	130
5.12.3	Leistungsdioden (Gleichrichter)	131
5.13	Prüfen von Halbleiterdioden	132
5.14	Kennwerte und Grenzwerte	133
5.15	Lernziel-Test	135
6	Halbleiterdioden mit speziellen Eigenschaften	137
6.1	Z-Dioden	137
6.1.1	Allgemeines	137
6.1.2	Zenereffekt	137
6.1.3	Lawineneffekt	138
6.1.4	Durchbruchverhalten	138
6.1.5	Regeneration der Sperrschicht	139
6.1.6	Kennlinien, Kennwerte, Grenzwerte	139
6.1.7	Anwendungen	143
6.1.8	Temperaturkompensation	144
6.2	Kapazitätsdioden	145
6.2.1	Aufbau und Arbeitsweise	145
6.2.2	Kennlinien, Kennwerte, Grenzwerte	147
6.2.3	Anwendungen	148
6.3	Tunneldioden (Esakidioden)	149
6.3.1	Aufbau und Arbeitsweise	149
6.3.2	Kennwerte und Grenzwerte	151
6.3.3	Anwendungen	151

6.4	Backwarddioden	152
6.5	PIN-Dioden	153
6.5.1	Aufbau und Arbeitsweise	153
6.5.2	Kennwerte und Grenzwerte	155
6.5.3	Anwendungen	155
6.6	Schottky-Dioden (Hot-Carrier-Dioden)	156
6.6.1	Aufbau und Arbeitsweise	156
6.6.2	Kennwerte und Grenzwerte	157
6.6.3	Anwendungen	157
6.7	Lernziel-Test	157
7	Bipolare Transistoren	159
7.1	Allgemeines	159
7.2	Arbeitsweise von pnp-Transistoren	159
7.3	Arbeitsweise von npn-Transistoren	163
7.4	Spannungen und Ströme beim Transistor	165
7.5	Kennlinienfelder und Kennwerte (Emittergrundschaltung)	167
7.5.1	Eingangskennlinienfeld	168
7.5.2	Ausgangskennlinienfeld	169
7.5.3	Stromsteuerungskennlinienfeld	170
7.5.4	Rückwirkungskennlinienfeld	171
7.5.5	Vierquadrantenkennlinienfeld	172
7.6	Wahl des Transistorarbeitspunktes	173
7.7	Steuerung des Transistors	176
7.8	Restströme, Sperrspannungen und Durchbruchspannungen	180
7.8.1	Restströme	180
7.8.2	Sperrspannungen	182
7.8.3	Durchbruchspannungen	182
7.9	Übersteuerungszustand und Sättigungsspannungen	183
7.10	Transistorverlustleistung	184
7.10.1	Verlustleistung und Verlusthyperbel	184
7.10.2	Kühlung von Transistoren	186
7.11	Temperatureinfluss und Arbeitspunktstabilisierung	187
7.12	Transistor-Rauschen	189
7.12.1	Ursachen des Rauschens	189
7.12.2	Widerstandsrauschen	189
7.12.3	Rauschzahl und Rauschmaß	190
7.13	Transistordaten	192
7.13.1	Kennwerte	192
7.13.1.1	Signalkennwerte	193
7.13.1.2	Gleichstromverhältnis	193
7.13.1.3	Restströme und Durchbruchspannungen	193
7.13.1.4	Sperrschichtkapazitäten	193
7.13.1.5	Grenzfrequenzen	194
7.13.1.6	Wärmewiderstände	194
7.13.1.7	Rauschmaß	194
7.13.1.8	Transistor-Schaltzeiten	194
7.13.2	Grenzwerte	195
7.13.2.1	Höchstzulässige Sperrspannungen	195
7.13.2.2	Höchstzulässige Ströme	195
7.13.2.3	Höchstzulässige Verlustleistungen	195
7.13.2.4	Höchstzulässige Temperaturen	195
7.13.3	Datenblätter	196

7.14	Anwendungen	196
7.14.1	Transistorschalterstufen	196
7.14.2	Transistorverstärker	197
7.14.2.1	Einstufige Verstärker	197
7.14.2.2	Mehrstufige Verstärker	198
7.14.3	Verstärker-Grundsaltungen	200
7.15	Lernziel-Test	201
8	Unipolare Transistoren	203
8.1	Sperrschicht-Feldeffekttransistoren (JFET)	203
8.1.1	Aufbau und Arbeitsweise	203
8.1.2	Kennlinien, Kennwerte, Grenzwerte	207
8.1.3	Anwendungen	210
8.2	MOS-Feldeffekttransistoren (IG-FET)	212
8.2.1	Aufbau und Arbeitsweise	212
8.2.1.1	Allgemeines	212
8.2.1.2	Anreicherungstyp	214
8.2.1.3	Verarmungstyp	214
8.2.1.4	Sperrschichtaufbau und Kanalabschnürung	214
8.2.2	Kennlinien, Kennwerte, Grenzwerte	216
8.2.3	Temperaturabhängigkeit	220
8.2.4	Verlustleistung	220
8.2.5	Anwendungen	221
8.2.5.1	Sourceschaltung	221
8.2.5.2	Drainschaltung	223
8.2.5.3	Gateschaltung	224
8.3	Dual-Gate-MOS-FET	225
8.4	Unijunktionstransistoren (UJT)	226
8.5	Lernziel-Test	229
9	Integrierte Schaltungen	231
9.1	Allgemeines	231
9.2	Integrationstechniken	232
9.2.1	Monolithtechnik (Halbleiterblocktechnik)	232
9.2.2	Hybridtechnik	236
9.2.2.1	Dünnschichttechnik	236
9.2.2.2	Dickschichttechnik	236
9.3	Analoge und digitale integrierte Schaltungen	237
9.3.1	Digitale IC	237
9.3.2	Analoge IC	238
9.4	Integrationsgrad und Packungsdichte	239
9.5	Vor- und Nachteile integrierter Schaltungen	239
9.6	Nanotechnik	240
9.6.1	Ergebnisse der Nanotechnik	240
9.6.2	Festkörperspeicher in Nanotechnik	240
9.7	Operationsverstärker	242
9.7.1	Einführung	242
9.7.2	Aufbau und Arbeitsweise	242
9.7.3	Idealer Operationsverstärker	245
9.7.4	Realer Operationsverstärker	246
9.7.5	Anwendungen	246
9.8	Lernziel-Test	248

10 Thyristoren	249
10.1 Vierschichtdioden (Thyristordioden)	249
10.1.1 Aufbau und Arbeitsweise	249
10.1.2 Kennwerte und Grenzwerte	251
10.1.3 Anwendungen	253
10.2 Thyristoren (rückwärtssperrende Thyristortrioden)	253
10.2.1 Aufbau und Arbeitsweise	253
10.2.2 Schaltverhalten	258
10.2.3 Kennwerte und Grenzwerte	261
10.2.4 Anwendungen	263
10.2.4.1 Thyristor im Wechselstromkreis	263
10.2.4.2 Thyristor im Gleichstromkreis	265
10.3 Thyristortetroden	266
10.3.1 Aufbau und Arbeitsweise	266
10.3.2 Kennwerte und Grenzwerte	267
10.3.3 Anwendungen	268
10.4 GTO-Thyristoren	268
10.4.1 Aufbau und Arbeitsweise	268
10.4.2 Kennwerte und Grenzwerte	269
10.4.3 Anwendungen	271
10.5 Lernziel-Test	272
11 Diac und Triac	273
11.1 Diac	273
11.1.1 Zweirichtungsdioden	273
11.1.1.1 Aufbau und Arbeitsweise	273
11.1.1.2 Kennwerte und Grenzwerte	274
11.1.2 Zweirichtungs-Thyristordioden	275
11.1.2.1 Aufbau und Arbeitsweise	275
11.1.2.2 Kennwerte und Grenzwerte	275
11.1.3 Anwendung von Diac	276
11.2 Triac	276
11.2.1 Aufbau und Arbeitsweise	276
11.2.2 Triggermodes	279
11.2.3 Kennwerte und Grenzwerte	280
11.3 Steuerungen mit Diac und Triac	281
11.4 Lernziel-Test	284
12 Fotohalbleiter	285
12.1 Innerer fotoelektrischer Effekt	285
12.2 Fotowiderstände	286
12.2.1 Aufbau und Arbeitsweise	286
12.2.2 Kennwerte und Grenzwerte	287
12.2.3 Anwendungen	288
12.3 Fotoelemente und Solarzellen	288
12.3.1 Aufbau und Arbeitsweise	288
12.3.1.1 Silizium-Fotoelemente	288
12.3.1.2 Selen-Fotoelemente	292
12.3.2 Kennwerte und Grenzwerte	294
12.3.3 Anwendungen	295
12.4 Fotodioden	295
12.4.1 Aufbau und Arbeitsweise	295

12.4.2	Kennwerte und Grenzwerte	296
12.4.3	Anwendungen	297
12.5	Fototransistoren	297
12.5.1	Aufbau und Arbeitsweise	297
12.5.2	Kennwerte und Grenzwerte	298
12.5.3	Anwendungen	298
12.6	Fotothyristoren, Fotothyristortetroden	299
12.6.1	Aufbau und Arbeitsweise	299
12.6.2	Kennwerte und Grenzwerte	300
12.6.3	Anwendungen	301
12.7	Leuchtdioden (LED)	301
12.7.1	Grundlagen	301
12.7.2	Aufbau und Arbeitsweise	302
12.7.3	Technologie der LED	304
12.7.4	Bauformen	305
12.7.5	Versorgungsschaltungen	306
12.7.6	LED-Farben	308
12.7.7	Anwendungen	309
12.7.8	Wirkungsgrad	310
12.7.9	Lebensdauer, Temperatureinflüsse	310
12.7.10	Vorteile / Nachteile zu konventionellen Leuchtmitteln	310
12.7.11	Kennwerte und Grenzwerte	311
12.8	Halbleiterlaser	311
12.9	Lichtwellenleiter	313
12.10	Opto-Koppler	316
12.10.1	Aufbau und Arbeitsweise	316
12.10.2	Kennwerte und Grenzwerte	316
12.10.3	Anwendungen	318
12.11	Lernziel-Test	318
13	Halbleiterbauelemente mit speziellen Eigenschaften	319
13.1	Hallgeneratoren	319
13.1.1	Halleffekt	319
13.1.2	Hallspannung	319
13.1.3	Aufbau	320
13.1.4	Kennwerte und Grenzwerte	321
13.1.5	Anwendungen	322
13.2	Feldplatten	323
13.2.1	Aufbau	323
13.2.2	Widerstandsänderung	323
13.2.3	Kennwerte und Grenzwerte	324
13.2.4	Anwendungen	324
13.3	Magnetdioden	325
13.3.1	Aufbau	325
13.3.2	Widerstandsänderung	326
13.3.3	Kennwerte und Grenzwerte	326
13.3.4	Anwendungen	327
13.4	Druckabhängige Halbleiterbauelemente	327
13.4.1	Piezoeffekt	327
13.4.2	Piezohalbleiter	328
13.5	Flüssigkristall-Bauteile	328
13.5.1	Flüssige Kristalle (LCD, engl. Liquid Crystal Device)	328

13.5.2	Aufbau von Anzeigebauteilen	329
13.5.3	Anwendungen	332
13.6	Thin-Film-Transistor(TFT)-LCD-Bildschirme	332
13.7	Plasma-Displays (PDP = Plasma Display Panel)	335
13.8	Lernziel-Test	336
14	Elektronen- und Ionenröhren	337
14.1	Thermoemission	337
14.2	Röhrendiode (Zweipolröhre, Vakuumdiode)	337
14.3	Triode (Dreipolröhre) :	339
14.3.1	Kennlinien	339
14.3.2	Kennwerte	340
14.3.3	Anodenrückwirkung	341
14.3.4	Spannungsverstärkung	342
14.3.5	Anodenverlustleistung	343
14.4	Tetrode (Vierpolröhre)	344
14.5	Pentode (Fünfpolröhre)	344
14.5.1	Kennlinien	345
14.5.2	Kennwerte	345
14.5.3	Spannungsverstärkung	347
14.5.4	Vor- und Nachteile der Pentode gegenüber der Triode	347
14.6	Elektronenstrahlröhren	348
14.6.1	Strahlerzeugungssystem	348
14.6.2	Strahlbündelungssystem	349
14.6.3	Strahlablenksystem	350
14.6.4	Leuchtschirm	351
14.6.5	Stromkreis der Elektronenstrahlröhren	352
14.7	Ionenröhren	352
14.7.1	Stoßionisation	352
14.7.2	Gasdiode	353
14.7.3	Glimmröhren	354
14.7.3.1	Aufbau und Arbeitsweise	354
14.7.3.2	Anwendungen	354
14.8	Fotozellen	356
14.8.1	Fotoemission	356
14.8.2	Aufbau und Arbeitsweise	357
14.8.2.1	Vakuumfotozellen	357
14.8.2.2	Gasfotozellen	358
14.9	Lernziel-Test	359
15	Lösungen der Lernziel-Tests	360
Anhang		
Datenblätter	369
Glossar	378
Stichwortverzeichnis	379