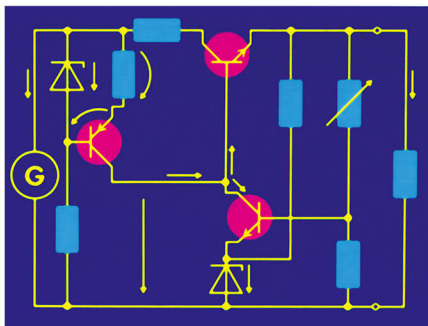


Beuth / Schmusch

Grundsaltungen

Elektronik 3



Beuth/Schmusch

Grundsaltungen

Elektronik 3

Klaus Beuth / Wolfgang Schmusch

Grundsaltungen

18., überarbeitete Auflage
unter Mitwirkung von Olaf Beuth

Vogel Business Media

Weitere Informationen:

www.vbm-fachbuch.de



<http://twitter.com/vbmfachbuch>



www.facebook.com/vbm-fachbuch



www.vbm-fachbuch.de/rss/buch.rss

ISBN 978-3-8343-3429-9

18. Auflage. 2018

Alle Rechte, auch der Übersetzung, vorbehalten.

Kein Teil des Werkes darf in irgendeiner Form (Druck, Fotokopie, Mikrofilm oder einem anderen Verfahren) ohne schriftliche Genehmigung des Verlages reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden. Hiervon sind die in §§ 53, 54 UrhG ausdrücklich genannten Ausnahmefälle nicht berührt.

Printed in Germany

Copyright 1976 by Vogel Business Media GmbH & Co. KG, Würzburg

Das Umschlagbild ist eine freie grafische Umsetzung von Bild 4.14

Vorwort

Mit dem vorliegenden Band «Elektronik 3, Grundsaltungen» wird die Elektronik-Reihe fortgesetzt. In dieser Auflage wurde, wie in anderen Bänden der Elektronik-Reihe auch, die Gestaltung des Themas weiterentwickelt. Das neue Layout orientiert sich optisch an veränderte Lese- und Lerngewohnheiten. Lebende Kolumnentitel erleichtern die Orientierung im Text, mit Icons ausgezeichnete Kernpunkte halten Wesentliches fest. Das Schriftbild ist gefälliger, wichtige Formeln und Gleichungen wurden mit rotem Rahmen besser hervorgehoben und bleiben so leichter im Gedächtnis. Beispiele sind jetzt besonders ausgewiesen und somit beim Nachschlagen leicht auffindbar.

Die Verfasser haben sich die Aufgabe gestellt, nach den im Band «Elektronik 2» behandelten elektronischen Bauelementen dem Leser die Kenntnis der grundlegenden elektronischen Schaltungen zu vermitteln. Dabei wird besonderer Wert auf klare systematische Darstellung und möglichst große Anschaulichkeit gelegt.

Sehr viele Skizzen, Bilder und Diagramme erleichtern das Verstehen. Das Erarbeiten des teilweise komplizierten Stoffes wird nicht durch eine ebenfalls komplizierte, fremdwortreiche «Wissenschaftssprache» zusätzlich erschwert. Mit einfachen Formulierungen wird das Wesentliche herausgestellt. Auf mathematische Ableitungen konnte zwar nicht ganz verzichtet werden, sie wurden jedoch auf ein sinnvolles, der Praxis angemessenes Maß beschränkt. Höhere Mathematik ist zum Verständnis nicht erforderlich.

Die Wirkungsweisen und Anwendungsmöglichkeiten der Schaltungen werden an Beispielen dargestellt, die der Praxis entnommen wurden. Für die Schaltungsbemessung sind ausführlich dargestellte Berechnungen mit den notwendigen Begründungen angegeben. Auf integrierte Schaltungen der Analog- und Digitaltechnik wird besonders eingegangen. Ein zweckmäßiger Einsatz integrierter Schaltungen setzt die Kenntnis der entsprechenden Grundsaltungen voraus.

Die einzelnen Abschnitte sind – wie in Band «Elektronik 2» – so aufgebaut, dass ein Selbststudium ohne Schwierigkeiten möglich ist, obwohl das Buch in erster Linie als unterrichtsbegleitendes Lernmittel für Schulen und Fortbildungskurse gedacht ist. Es ist auf die Bedürfnisse der in der Praxis stehenden Ingenieure, Meister, Techniker und Facharbeiter verschiedenster Berufszweige zugeschnitten, die über Kenntnisse der Arbeitsweise elektronischer Bauelemente verfügen und sich in die elektronische Schaltungstechnik einarbeiten wollen. Auch Nichttechniker mit entsprechenden Vorkenntnissen können das Buch mit Erfolg nutzen.

Waldkirch und Freiburg/Br.

Klaus Beuth
Wolfgang Schmusch

Zur Fachbuchreihe «Elektronik»
gehören die Bände:

Klaus Beuth/Olaf Beuth:
Elementare Elektronik

Heinz Meister:
Elektrotechnische Grundlagen
(Elektronik 1)

Klaus Beuth:
Bauelemente
(Elektronik 2)

Klaus Beuth/Wolfgang Schmusch:
Grundsaltungen
(Elektronik 3)

Klaus Beuth:
Digitaltechnik
(Elektronik 4)

Helmut Müller/Lothar Walz:
Mikroprozessortechnik
(Elektronik 5)

Wolfgang Schmusch:
Elektronische Messtechnik
(Elektronik 6)

Klaus Beuth/Richard Hanebuth/Günter Kurz/Christian Lüders:
Nachrichtentechnik
(Elektronik 7)

Wolf-Dieter Schmidt:
Sensorschaltungstechnik
(Elektronik 8)

Olaf Beuth/Klaus Beuth:
Leistungselektronik
(Elektronik 9)

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	18
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 Wobbeln 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	70
	2.7.2.1	Durchflusswandler	70
	2.7.2.2	Sperrwandler	71
	2.7.3	Sekundärgetaktete Schaltnetzteile	73
	2.7.4	Schaltnetzteil mit Gegentaktflusswandler	73
2.8		Kondensatornetzteile	74
3		Verstärkerschaltungen	79
	3.1	Grundschtung des Transistors	79
	3.2	Ersatzschaltung des Transistors bei Kleinsignalaussteuerung	80
	3.2.1	Der differentielle Eingangswiderstand r_{BE} (Vierpolparameter h_{11e})	80
	3.2.2	Differentieller Ausgangswiderstand r_{CE} (Vierpolparameter $1/h_{22e}$)	81
	3.2.3	Rückwirkung	82
	3.2.4	Eingangs- und Ausgangskapazität	83
	3.2.5	Ersatzschaltbild nach GIACOLETTO	83
	3.2.6	h -Parameter-Ersatzschaltbild	84
	3.3	Emitterschaltung	85
	3.3.1	Arbeitspunkteinstellung	86
	3.3.1.1	Arbeitspunkteinstellung mit Spannungsteiler	87
	3.3.1.2	Arbeitspunkteinstellung mit Vorwiderstand	88
	3.3.2	Arbeitspunktstabilisierung	89
	3.3.2.1	Stabilisierung durch Temperaturkompensation	90
	3.3.2.2	Stabilisierung durch Gegenkopplung	90
	3.3.3	Kleinsignalverhalten der Emitterschaltung	95
	3.3.3.1	Verstärkung der Emitterschaltung	95
	3.3.3.2	Eingangs- und Ausgangswiderstand	98
	3.3.3.3	Ankopplung des Verbraucherwiderstandes	100
	3.3.3.4	Berechnung einer Emitterschaltung	102
	3.3.4	Kleinsignalverhalten der Emitterschaltung mit Strom- und Spannungsgegenkopplung	105

3.3.4.1	Stromgegenkopplung	106
3.3.4.2	Spannungsgegenkopplung	109
3.3.5	Anwendung der Emitterschaltung	111
3.4	Kollektorschaltung (Emitterfolger)	111
3.4.1	Arbeitspunkteinstellung	111
3.4.2	Kleinsignalverhalten der Kollektorschaltung	113
3.4.2.1	Verstärkung	113
3.4.2.2	Eingangs- und Ausgangswiderstand	115
3.4.3	Kollektorschaltung als Impedanzwandler	117
3.4.4	Bootstrap-Schaltung	118
3.4.5	Darlington-Schaltung	118
3.5	Basisschaltung	120
3.5.1	Arbeitspunkteinstellung	120
3.5.2	Kleinsignalverhalten der Basisschaltung	120
3.5.2.1	Eingangs- und Ausgangswiderstand	121
3.5.2.2	Verstärkung	122
3.6	Wechselspannungsverstärker	125
3.6.1	Kenngrößen des Wechselspannungsverstärkers	125
3.6.1.1	Verstärkung	125
3.6.1.2	Spannungsfrequenzgang	126
3.6.1.3	Phasenverschiebung	129
3.6.1.4	Signalverzerrungen – Klirrfaktor	129
3.6.1.5	Störspannungen	130
3.6.2	Mehrstufige Verstärker	132
3.6.2.1	Verstärkung und Bandbreite	132
3.6.2.2	Kopplung mehrstufiger Verstärker	134
3.6.3	Breitbandverstärker	136
3.6.3.1	Untere Grenzfrequenz f_{gu}	137
3.6.3.2	Obere Grenzfrequenz	140
3.6.3.3	Erhöhung der Bandbreite durch Gegenkopplung	142
3.6.4	Nf-Vorverstärker	144
3.6.4.1	Anforderungen	144
3.6.4.2	Schaltungsbeispiele mit bipolaren Transistoren	145
3.6.4.3	Schaltungsbeispiele mit Feldeffekt-Transistoren	148
3.6.5	Nf-Leistungsverstärker	150
3.6.5.1	Anforderungen	150
3.6.5.2	Verstärkerarten	151
3.6.5.3	Kollektorschaltung als Leistungsverstärker im A-Betrieb	154
3.6.5.4	Kollektorschaltung im Gegentaktbetrieb	155
3.7	Gleichspannungsverstärker	160
3.7.1	Anforderungen	160
3.7.2	Differenzverstärker	161
3.7.2.1	Grundsaltung des Differenzverstärkers	161
3.7.2.2	Asymmetrischer Ausgang	164
3.7.2.3	Anwendungen des Differenzverstärkers	168
3.8	Operationsverstärker	169

3.8.1	Betriebsarten des Operationsverstärkers	170
3.8.2	Kenngrößen des Operationsverstärkers	170
3.8.2.1	Ruhegleichstrom – Stromoffset	171
3.8.2.2	Eingangs- und Ausgangswiderstände	173
3.8.2.3	Frequenzgang der Leerlaufverstärkung	175
3.8.2.4	Spannungsoffset	177
3.8.2.5	Gleichtaktverstärkung und Gleichtaktunterdrückung	179
3.8.2.6	Zusammenfassung der Eingangsspannungen . .	182
3.8.2.7	Aussteuerbereich des OPV	183
3.8.2.8	Maximale Anstiegsgeschwindigkeit	184
3.8.2.9	Zusammenstellen von Datenblattwerten	184
3.8.3	Grundsaltungen der Gegenkopplung	185
3.8.3.1	Gegenkopplungsarten des OPV	185
3.8.3.2	Wirkungsweise der Gegenkopplung	187
3.8.3.3	Schleifenverstärkung – Grenzen der Gegenkopplung	190
3.8.3.4	Linearität, Bandbreite und Phasenverschiebung des gegengekoppelten Verstärkers	191
3.8.3.5	Stabilität des gegengekoppelten Verstärkers . .	194
3.8.4	Ausgewählte gegengekoppelte Schaltungen	194
3.8.4.1	Nichtinvertierender Verstärker (Elektrometerverstärker)	195
3.8.4.2	Invertierender Verstärker	198
3.8.4.3	Summierverstärker	202
3.8.4.4	Subtrahierverstärker – Differenzverstärker . . .	203
3.8.4.5	Umschalten von invertierendem Betrieb auf nichtinvertierenden Betrieb	205
3.8.4.6	Filterschaltungen	205
3.8.4.7	Integrierverstärker	212
3.8.4.8	Stromquellen und Stromverstärker	215
3.8.4.9	Prinzip des Regelverstärkers	217
3.8.4.10	Instrumentierungsverstärker	218
3.8.4.11	Transimpedanzverstärker	219
4	Schaltungen zur Stabilisierung von Spannungen und Strömen	225
4.1	Einführung	225
4.2	Konstantspannungsquelle	225
4.3	Konstantstromquelle	228
4.4	Stabilisierung	228
4.4.1	Spannungsstabilisierung	229
4.4.1.1	Kenngrößen der Stabilisierung	229
4.4.1.2	Parallelstabilisierung	230
4.4.1.3	Serienstabilisierung	238
4.4.2	Stromstabilisierung	250
4.4.2.1	Transistoren als Stromquelle	250
4.4.2.2	Stromquelle mit Operationsverstärker	252
4.4.2.3	Stromquelle für höhere Ströme	252

4.4.3	Strombegrenzung	254
4.4.3.1	Überstromsicherung	255
4.4.3.2	Strombegrenzung durch Widerstand	256
4.4.3.3	Stromregelung	259
4.4.4	Spannungsstabilisierung mit Schaltregler	264
4.4.4.1	Prinzip eines Schaltreglers mit Speicherdrossel (Durchflusswandler)	265
4.4.4.2	Schaltregler nach dem Sperrwandlerprinzip	272
4.4.4.3	Regelung des Tastverhältnisses	277
4.4.4.4	Integrierte Festspannungsregler	282
5	Transistor-Schalterstufen	287
5.1	Allgemeines	287
5.2	Betriebsarten	288
5.2.1	Nichtübersteuertes Betrieb	288
5.2.2	Übersteuertes Betrieb	290
5.3	Schaltvorgänge und Schaltzeiten	292
5.3.1	Schalten in den Durchlasszustand	292
5.3.2	Schalten in den Sperrzustand	294
5.3.3	Beeinflussung der Schaltzeiten	296
5.4	Schalten bei verschiedenartiger Belastung	297
5.4.1	Schalten bei ohmscher Belastung	297
5.4.2	Schalten bei kapazitiver Belastung	298
5.4.3	Schalten bei induktiver Belastung	300
5.4.4	Schalten von Heiß- und Kaltleitern	302
5.5	Belastbarkeit	303
5.5.1	Höchstzulässige Verlustleistung	303
5.5.2	Mittlere Verlustleistung	305
5.5.3	Impulsverlustleistung	309
5.6	Mehrstufige Transistorschalter	312
6	Schaltungen mit Mehrschichtdioden, Diac und Triac	315
6.1	Vierschichtdiode als elektronischer Schalter	315
6.2	Thyristor als elektronischer Schalter	316
6.2.1	Zündschaltungen	316
6.2.1.1	Allgemeines	316
6.2.1.2	Phasenanschnittsteuerung	319
6.2.1.3	Vollwellensteuerung (Wellenpaketsteuerung)	324
6.2.2	Anwendungen des Thyristors	325
6.2.2.1	Vollweg-Leistungssteuerung	325
6.2.2.2	Einstellbarer Gleichrichter	326
6.2.2.3	Vollwellenschaltung	326
6.3	Diac und Triac als elektronische Schalter	327
6.3.1	Phasenanschnittsteuerung	327
7	Kippschaltungen	329
7.1	Bistabile Kippstufe	329
7.1.1	Arbeitsweise	329

7.1.2	Ansteuerungsarten	332
7.1.3	Bistabile Kippstufen mit besonderen Eigenschaften	335
7.1.4	Anwendungsbeispiele	336
7.1.4.1	Bistabile Kippstufe als Frequenzteiler	336
7.1.4.2	Bistabile Kippstufe als Signalspeicher	337
7.1.5	Bemessung bistabiler Kippstufen	338
7.2	Monostabile Kippstufe	340
7.2.1	Arbeitsweise	340
7.2.2	Monostabile Kippstufe mit Schutzdiode	343
7.2.3	Ansteuerungsarten	343
7.2.4	Anwendungsbeispiele	345
7.2.4.1	Schaltung zur Impulsverlängerung	345
7.2.4.2	Schaltung zur Impulsregenerierung	345
7.2.5	Schaltzeichen	347
7.2.6	Bemessung monostabiler Kippstufen	347
7.3	Astabile Kippschaltung (Multivibrator)	349
7.3.1	Arbeitsweise	350
7.3.2	Schaltungsaufbau und Impuls-Pausen-Verhältnis	352
7.3.3	Bemessung von astabilen Kippschaltungen	355
7.3.4	Anwendungsbeispiele	358
7.3.4.1	Impulsgeber	358
7.3.4.2	Rechteckgenerator	359
7.3.4.3	Einfache Blinkschaltung	359
7.3.5	Synchronisierte astabile Kippschaltung	359
7.3.6	Schaltzeichen	360
7.4	Kippschaltungen mit Operationsverstärker	361
7.4.1	Bistabile Kippstufe	361
7.4.2	Monostabile Kippstufe	361
7.4.3	Astabile Kippstufe	362
8	Generatorschaltungen	363
8.1	Prinzip einer Generatorschaltung	363
8.1.1	Allgemeine Schwingbedingungen	365
8.2	Erzeugung rechteckförmiger Spannungen	366
8.3	Erzeugung von sägezahnförmigen Spannungen	367
8.3.1	Sägezahngenerator mit Stromquelle	369
8.3.2	Miller-Integrator	370
8.3.3	Sägezahngenerator mit DA-Umsetzer	376
8.3.4	Synchronisierung eines Sägezahngenerators	376
8.4	Erzeugung sinusförmiger Spannungen	378
8.4.1	LC-Generatoren	379
8.4.1.1	Meißner-Oszillator	379
8.4.1.2	Induktive Dreipunktschaltung (Hartley-Oszillator)	380
8.4.1.3	Kapazitive Dreipunktschaltung (Colpitts-Oszillator)	381
8.4.2	Quarzgeneratoren	383
8.4.3	RC-Generatoren	386

8.4.3.1	Phasenschiebegerator	387
8.4.3.2	Wien-Robinson-Generator	388
9	Impulsformerschaltungen	391
9.1	Zeitfunktionen von Strom und Spannung	391
9.2	Begrenzerschaltungen	393
9.2.1	Begrenzerschaltungen mit Dioden	393
9.2.2	Begrenzerschaltungen mit Transistoren	397
9.3	Integrierglied	398
9.3.1	Arbeitsweise des RC-Gliedes	398
9.3.2	Mathematische und elektrische Integration	400
9.4	Differenzierglied	401
9.4.1	Arbeitsweise des CR-Gliedes	401
9.4.2	Mathematische und elektrische Differentiation	404
9.5	Schmitt-Trigger	406
9.5.1	Arbeitsweise	406
9.5.2	Bemessung eines Schmitt-Triggers	408
9.5.3	Anwendungsbeispiele	411
9.5.3.1	Schwellwertschalter	411
9.5.3.2	Sinus-Rechteck-Spannungswandler	413
9.5.4	Schaltzeichen	414
10	Grundlagen der Regelungstechnik	417
10.1	Allgemeines	417
10.1.1	Begriffe der Regelungstechnik	418
10.1.2	Darstellung des Regelkreises	419
10.2	Zeitverhalten der Regelkreisglieder	422
10.2.1	Unstetige Regeleinrichtungen	422
10.2.2	Stetige Regeleinrichtungen	424
10.2.2.1	Proportionale Regeleinrichtung (P-Regelung)	424
10.2.2.2	Integrierende Regeleinrichtung (I-Regelung)	427
10.2.2.3	PI-Regeleinrichtung	429
10.2.2.4	D-Regeleinrichtung	430
10.2.2.5	PD-Regeleinrichtung	431
10.2.2.6	PID-Regeleinrichtung	432
10.3	Beispiele für einfache Regelkreise	432
10.3.1	Temperaturregelung	432
10.3.2	Drehzahlregelung von Kleinmotoren	435
11	Einführung in die Digitaltechnik	437
11.1	Grundbegriffe	437
11.1.1	Analoge und digitale Signale	437
11.1.2	Logische Zustände «0» und «1»	439
11.2	Logische Verknüpfungen	440
11.2.1	UND-Verknüpfung	440
11.2.2	ODER-Verknüpfung	443
11.2.3	Verneinung	445
11.2.4	NAND-Verknüpfung	446

11.2.5	NOR-Verknüpfung	447
11.3	Schaltungen logischer Glieder	449
11.3.1	Schaltungen in Relais-Technik	449
11.3.2	Schaltungen in DTL-Technik	450
11.3.3	Schaltungen in TTL-Technik	452
11.3.4	Schaltungen in MOS-Technik	453
11.4	Pegelangaben «Low» und «High»	455
11.4.1	Allgemeines	455
11.4.2	Positive Logik	456
11.4.3	Negative Logik	457
11.5	Schaltungsanalyse	458
11.5.1	Allgemeines	458
11.5.2	Soll-Verknüpfung	459
11.5.3	Ist-Verknüpfung	461
11.6	Schaltalgebra	461
11.6.1	Grundlagen	461
11.6.2	Bestimmung der Funktionsgleichung einer Schaltung	462
11.6.3	Darstellung der Schaltung nach der Funktionsgleichung	464
11.6.4	Funktionsgleichung und Kontaktschema	464
11.6.5	Nutzungsmöglichkeiten der Schaltalgebra	465
11.7	Schaltungssynthese	466
12	Digitale Codes und digitale Zähl- und Speichertechnik	469
12.1	Darstellung von Ziffern und Zahlen	469
12.1.1	Duales Zahlensystem	469
12.1.2	BCD-Code (8-4-2-1-Code)	471
12.1.3	Weitere Binär-Codes	473
12.2	Schaltungen zum Codieren und Decodieren	474
12.2.1	Umsetzen von Dezimalziffern in Dualzahlen	474
12.2.2	Umsetzen von Dualzahlen in Dezimalziffern	475
12.3	Rechnen mit Dualzahlen	476
12.3.1	Umwandlung von Zahlen	476
12.3.2	Addition von Dualzahlen	479
12.3.3	Subtraktion von Dualzahlen	481
12.4	Speichern und Verschieben digitaler Signale	482
12.4.1	Flipflop-Arten	482
12.4.2	Schieberegister	488
12.4.3	Flipflop-Speicher	494
12.5	Zählerschaltungen	496
12.5.1	Frequenzteiler	496
12.5.2	Vorwärtszähler	498
12.5.3	Rückwärtszähler	501
12.5.4	Zähldekaden	501
	Stichwortverzeichnis	505

1 Das Oszilloskop als vielseitiges Messgerät

Elektronische Schaltungen haben die Aufgabe, Gleich- und Wechselspannungen so zu verändern, dass sie einem geplanten Zweck dienen können. Zur Funktionskontrolle steht uns eine große Zahl von Messgeräten zur Verfügung. Solange die elektrische Größe zeitlich konstant bleibt, genügt die Erfassung des Betrages mit Hilfe eines Instrumentes. Zur Kennzeichnung einer Wechselstromgröße gehören aber zusätzliche Angaben über die Kurvenform, die Periodendauer oder Frequenz und den Maximalwert. Gerade die Kurvenform einer Wechselgröße kann so vielfältig sein, dass sie nur durch ein Bild ausreichend beschrieben werden kann. Diese Bild-darstellung elektrischer Größen ist beinahe selbstverständlich geworden. Bestimmte elektrische Vorgänge werden gleichsam in einer Bildsprache beschrieben und nur so verständlich. Wir kennen den «sinusförmigen» Wechselstrom, die «Sägezahn»-Spannung und den «Rechteck»-Impuls, um nur einige solcher Bilder anzusprechen.

Als Vermittler derartiger «elektrischer» Bilder ist uns das Oszilloskop in der modernen Elektronik unentbehrlich. Vielfach ersetzt es eine ganze Reihe von Einzelinstrumenten: Spannungsmesser, Strommesser, Frequenzmesser, Phasemesser usw.

Die prinzipielle Funktionsweise des Oszilloskops ist in «Schmusch, Elektronik 6, Vogel Business Media» dargestellt. Hier sollen zunächst die Kenndaten erläutert werden.

1.1 Kenndaten eines Oszilloskops

1.1.1 Empfindlichkeit – Ablenkoeffizient

Die Darstellung des zeitlichen Verlaufes einer Spannung erfolgt durch Ablenkung des Elektronenstrahles in Y- und X-Richtung. In der vertikalen Y-Richtung wird entsprechend einem Koordinatensystem der Betrag der Spannung angezeigt, während in der horizontalen X-Richtung die Zeitablenkung erfolgt.

Die Ablenkspannung für die Y-Richtung liefert der Y-Verstärker, der von dem zu messenden Eingangssignal gespeist wird. Die X-Ablenkung erfolgt entweder durch die Zeitbasis oder über den X-Verstärker von einem externen Signal.

Je größer die Verstärkung des Y- und X-Verstärkers ist, desto empfindlicher reagiert der Elektronenstrahl auf Änderungen der Y- und X-Eingangsspannung.

Definition

Die Empfindlichkeit oder der Ablenkoeffizient des Oszilloskops gibt an, welche Spannungsänderung am Y- bzw. X-Eingang nötig ist, um den Strahl um 1 cm oder 1 Rastereinheit in Y- oder X-Richtung zu verschieben.

Die Empfindlichkeit in Y-Richtung kann durch einen Spannungsteiler, Abschwächer genannt, am Eingang des Y-Verstärkers in weiten Grenzen verändert werden und so der Größe des Eingangssignals angepaßt werden.

Die Verstärkung des X-Verstärkers liegt meist fest oder kann nur in 2 oder 3 Stufen geändert werden.





Grundsatz

Die Empfindlichkeit oder der Ablenkkoeffizient wird in mV/Rastereinheit angegeben.

An englischen oder amerikanischen Geräten findet man die Angabe V/Div., d.h., Volt per Division oder übersetzt Volt per Teilungsabschnitt.

Für ein gutes Oszilloskop gilt z.B.:

Y-Richtung: Ablenkkoeffizient: 2 mV/cm
(höchste Empfindlichkeit)

X-Richtung: Ablenkkoeffizient: 200 mV/cm
(höchste Empfindlichkeit)



Beispiel

1. Die Spannungsspitzenwerte einer Wechsellspannung liegen auf dem Bildschirm 3,2 cm auseinander. Wie groß ist die Spitze-Spitze-Spannung, wenn der Ablenkkoeffizient 20 mV/cm beträgt:

$$\underline{U_{ss}} = 3,2 \text{ cm} \cdot 20 \text{ mV/cm} = \underline{64 \text{ mV}_{ss}}$$

2. Der Elektronenstrahl soll durch eine externe Spannung in X-Richtung vom linken Bildrand bis zum rechten Bildrand abgelenkt werden. Die Empfindlichkeit beträgt 200 mV/cm. Die Bildschirmbreite beträgt 12 cm. Wie groß muss die Spannung am X-Eingang sein?

$$\underline{U_x} = 12 \text{ cm} \cdot 200 \text{ mV/cm} = \underline{2,4 \text{ V}}$$

1.1.2 Anstiegszeit

Will man mit dem Oszilloskop eine Rechteckspannung darstellen, so zeigen sich Schwierigkeiten, wenn die Flankensteilheit des Eingangssignals sehr groß ist. Bedingt durch die Übertragungseigenschaften des Y-Verstärkers ist eine bestimmte Anstiegszeit des Rechteckes auf dem Bildschirm nicht zu unterschreiten, d.h., Rechtecke, die schneller ansteigen, werden auf dem Bildschirm dennoch mit der gleichen Anstiegszeit abgebildet (Bild 1.1).



Definition

Die Anstiegszeit des Oszilloskops ist die Zeit, die ein abgebildeter Spannungssprung braucht, um von 10% auf 90% seines Maximalwertes zu steigen, wenn der Eingangssprung unendlich steil ist.

Die Anstiegszeit ist im Wesentlichen durch die obere Grenzfrequenz der Verstärker bestimmt. Je höher sie liegt, umso steiler können die übertragenen Rechteckspannungen sein.

Grundsatz



Die Anstiegszeit des Oszilloskops in Y-Richtung ist durch die obere Grenzfrequenz des Y-Verstärkers bestimmt. Die Anstiegszeit in X-Richtung ist durch die obere Grenzfrequenz des X-Verstärkers bestimmt.

Zwischen oberer Grenzfrequenz und Anstiegszeit besteht der Zusammenhang:

$$T_{An} \approx \frac{1}{3 \cdot f_{go}}$$

So hat z.B. ein Oszilloskop mit 10 MHz oberer Grenzfrequenz des Y-Verstärkers die Anstiegszeit $T_{An} \cong 35 \text{ ns}$.

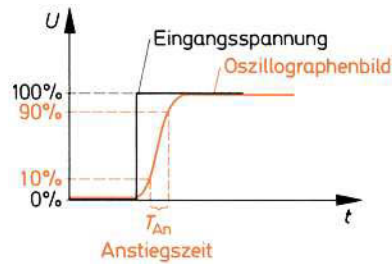


Bild 1.1
Anstiegszeit
des Oszilloskops

1.1.3 Bandbreite

Um abschätzen zu können, welche Signale ein Oszilloskop darstellen kann, wird das Nutzfrequenzband durch Angabe der unteren und oberen Grenzfrequenz als Kennwerte eingegrenzt.

Grundsatz



Bei der oberen und unteren Grenzfrequenz des Oszilloskops ist die Anzeige um den Faktor

$$\frac{1}{\sqrt{2}} = 0,707 \text{ oder } 3 \text{ dB kleiner als das Eingangssignal. Zwischen unterer und oberer}$$

Grenzfrequenz liegt der Arbeitsbereich des Oszilloskops.

Die Bandbreite ist die Differenz aus oberer und unterer Grenzfrequenz.

Beispiel



zur Angabe der Bandbreite in den Datenblättern:

Y-Verstärker: Bandbreite DC: 0 Hz...50 MHz (– 3 dB)

AC: 10 Hz...50 MHz (– 3 dB)

(Die Angabe – 3 dB in der Klammer deutet an, dass bei den Grenzfrequenzen 10 Hz und 50 MHz die Anzeige um 3 dB, d.h. um den Faktor 0,707, zu klein wird.)

1.1.3.1 Y-Verstärker

Moderne Oszilloskope sind zur Messung von Gleich- und Wechselspannungen geeignet. Entscheidend dafür ist die Ausführung des Verstärkers. Um sehr tiefe Frequenzen unterdrücken zu können, ist der Verstärker meist umschaltbar auf reine Wechselspannungsverstärkung mit einer unteren Grenzfrequenz von einigen Hz. Mit der englischen Bezeichnungswiese spricht man von DC-Betrieb (*Direct Current* = Gleichstrom) oder von AC-Betrieb (*Alternating Current* = Wechselstrom).

Die obere Grenzfrequenz ist je nach Oszilloskop sehr verschieden. Typische Werte sind 1 MHz, 10 MHz, 50 MHz, 100 MHz.

1.1.3.2 Zeitbasis

Die Zeitbasis erzeugt das Sägezahnsignal zur Ablenkung des Strahles in X-Richtung. Je nach Steilheit der Sägezahnspannung läuft der Strahl schneller oder langsamer horizontal über den Bildschirm. Dann entspricht jedem cm in X-Richtung ein definierter Zeitabschnitt.

Die Ausstattung der Zeitbasis richtet sich nach dem Frequenzband, das messbar sein soll. Je höher die Messfrequenz ist, desto höher muss die Sägezahnfrequenz sein.



Grundsatz

Die Zeitbasis ist in vielen Stufen einstellbar. Dabei wird für jede Stufe die Zeit angegeben, die der Strahl benötigt, um 1 cm oder 1 Raster in X-Richtung fortzuschreiten. Die Zeitbasis ist geeicht in: s/cm, ms/cm, µs/cm, ns/cm.

Bei Geräten mit englischer Beschriftung ist der Teiler für die Zeitbasis mit Time/Division gekennzeichnet, d.h. Zeit/Teilungseinheit.



Beispiel

für die Angabe der Zeitbasis in den Datenblättern:
Zeitbasis: 0,5 s/cm...50 ns/cm in 22 kalibrierten Stufen.

Rechnungsbeispiel: Eine Periode einer Wechselspannung erstreckt sich in X-Richtung über 4 cm. Die Zeitbasis ist eingestellt auf 0,5 ms/cm. Wie groß ist die Periodendauer?

$$T = 4 \text{ cm} \cdot 0,5 \text{ ms/cm} = 2 \text{ ms}$$

1.1.3.3 X-Verstärker

Statt der Zeitbasis benutzt man den X-Verstärker, wenn man eine externe Spannung zur X-Ablenkung einspeisen möchte. Der X-Verstärker hat meist eine wesentlich geringere Bandbreite als der Y-Verstärker. Typische Angaben sind:

X-Verstärker: Bandbreite: 0 Hz...1 MHz (– 3 dB)

1.1.4 Eingangswiderstand

Der Eingangswiderstand des Y-Verstärkers und des X-Verstärkers hat meist die gleiche Größe und beträgt bei tiefen Frequenzen in der Regel $1\text{ M}\Omega$. Die Angabe im Datenblatt des Oszilloskops lautet z.B.:

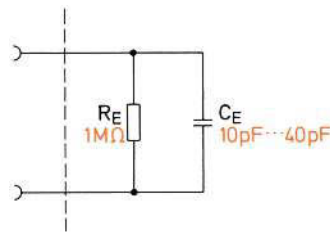
Y-Verstärker: Eingangsimpedanz $1\text{ M}\Omega\parallel 36\text{ pF}$

Daraus ist ersichtlich, dass am Eingang noch ein Kondensator von 36 pF parallel liegt. Der Eingangswiderstand ist deshalb frequenzabhängig. In dem angeführten Beispiel beträgt der Scheinwiderstand bei $f = 4,4\text{ kHz}$ nur noch $700\text{ k}\Omega$.

1.1.5 Eingangskapazität

Der Eingang des Y- und X-Verstärkers ist bei tiefen Frequenzen hochohmig und wird bei hohen Frequenzen durch die parallelliegende Eingangskapazität bestimmt. Sie liegt bei üblichen Oszilloskopen in der Größe von $10\text{...}40\text{ pF}$. Die Eingangsschaltung entspricht Bild 1.2.

Bild 1.2
Eingangswiderstand
des Oszilloskops



1.2 Tastköpfe

Tastköpfe gehören als Zubehör (Accessoires) zu jedem Oszilloskop. Sie sind insbesondere für die Hf-Messungen und bei sehr niedrigen Messspannungen unentbehrlich. Man unterscheidet im Wesentlichen 3 Ausführungsformen:

1. *1 : 1-Tastkopf-Messleitung:*

Die Eingangsspannung wird vom Messpunkt zum Eingang des Oszilloskops ohne Spannungsteilung übertragen.

2. *Tastkopf mit Spannungsteilung:*

Im Tastkopf befindet sich ein Spannungsteiler, der die Amplitude des Eingangssignals meist im Verhältnis $10 : 1$ herabsetzt.

3. *Tastkopf mit Gleichrichter (Demodulator):*

Hf-Eingangssignale werden gleichgerichtet. Die gewonnene Nf-Spannung wird an den Eingang des Oszilloskops geführt.

1.2.1 Einsatzmöglichkeiten und Vorteile von Tastköpfen

Um Signale in der Schaltung messen zu können, benötigt man eine Messschnur. Sie sollte nach Möglichkeit mit einer Tastspitze oder Greifklemme zum Befestigen der Leitung ausgerüstet sein. Häufig genügen einpolige Messstrippen, wie in Bild 1.3 angedeutet ist.

Die Messanordnung von Bild 1.3 ist nur verwendbar bei sehr niedrigen Frequenzen, niederohmigen Schaltungen und relativ hohen Spannungswerten (1 V).

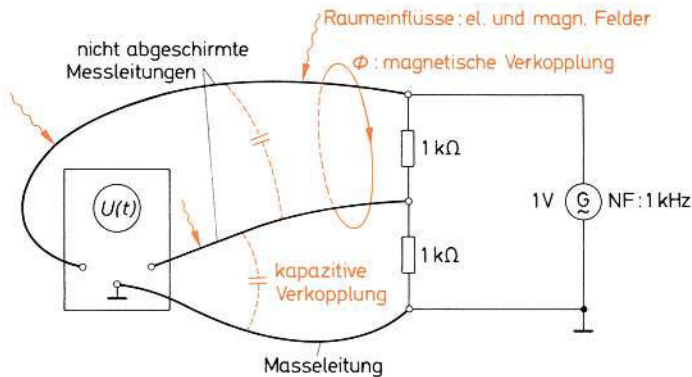


Bild 1.3
Störeinflüsse bei
Verwendung nicht
abgeschirmter
Messleitungen



Grundsatz

Bei höheren Frequenzen, hochohmigen Schaltungen und niedrigen Spannungspegeln müssen abgeschirmte Messleitungen verwendet werden.

Dies ist erforderlich, weil die Messergebnisse durch kapazitive bzw. induktive Kopplung zwischen den Messstrippen verfälscht werden (Bild 1.3, rot eingetragen). Außerdem ist die Messanordnung berührungsempfindlich, und die Anzeige hängt von der momentanen Lage der Messstrippen ab. Je hochohmiger die Schaltung ist, desto mehr wirken sich Störeinflüsse aus, weil die eingekoppelten Spannungen nicht mehr über kleine Widerstände nach «Masse kurzgeschlossen» werden. Bei niedrigen Messspannungen sind Einstreuungen durch Sender oder «Netzbrumm» besonders gefährlich.

1.2.1.1 1 : 1-Tastkopf

Für diese Zwecke ist der 1 : 1-Tastkopf mit koaxialer Messleitung einzusetzen (Bild 1.4). Er besitzt eine Greifklemme oder eine Spitze, mit der man bequem jeden Punkt der Schaltung abtasten kann. Die Kombination aus dem Tastkopf und der Koaxialleitung ist so abgestimmt, dass die Signalübertragung von der Messspitze bis zum Eingang des Oszilloskops über einen weiten Bereich frequenzunabhängig ist. Verkopplung unter den Leitungen und Fremdsignaleinstreuung sind durch die Abschirmung außerordentlich gering.

Der Masseanschluss muss in der Schaltung immer verwendet werden. Bei mehreren Tastköpfen werden alle Masseanschlüsse an einen Punkt gelegt (Bild 1.5).

Bild 1.4
Messleitung mit
1 : 1-Tastkopf

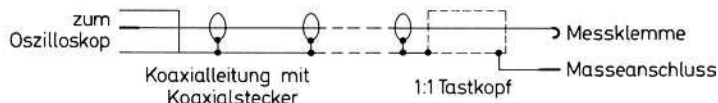
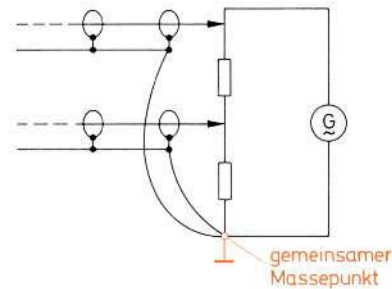


Bild 1.5
Anschluss der Masseklemmen von
abgeschirmten Messleitungen



Grundsatz

Die Tastkopfmessleitung verhindert kapazitive und induktive Verkopplung und ist gegen fremde Störsignale abgeschirmt.

1.2.1.2 10 : 1-Tastkopf

Oszilloskope haben meist den Eingangswiderstand $1\text{ M}\Omega$. Man könnte zwar noch höhere Werte erzielen, das brächte aber bei Wechselspannungen kaum einen Vorteil. Die Messung erfolgt immer über Messleitungen. Diese besitzen beträchtliche Parallelkapazitäten und bestimmen damit wesentlich den Eingangswiderstand.

Einen Vorteil bringt wiederum der Tastkopf. Man baut hier hochohmige Vorwiderstände ein, so dass der Eingangswiderstand an der Messspitze, unbeeinflusst von den Leitungskapazitäten, sehr groß ist. Bild 1.6 zeigt den üblichen 10 : 1-Tastkopf.

Grundsatz

Mit Hilfe des Tastkopfes können sehr hohe Eingangswiderstände erzielt werden. Typisch ist der Wert $10\text{ M}\Omega$.

Die Widerstandskombination im Tastkopf von Bild 1.6 bringt natürlich eine Spannungsteilung mit sich, die bei der Messung berücksichtigt werden muss. Sie beträgt

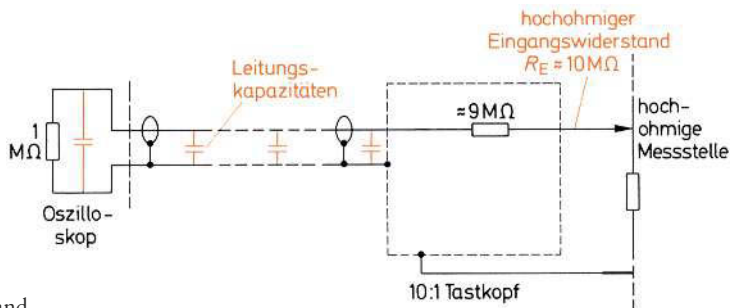


Bild 1.6
10:1-Tastkopf
mit hohem
Eingangswiderstand

in der Regel 10 : 1. Bei sehr großen Eingangssignalen ist die Teilung ohnehin notwendig, weil sonst das Oszilloskop übersteuert würde.

Die meisten Tastköpfe können wahlweise niederohmig als 1 : 1-Tastköpfe oder hochohmig durch einen Steckaufsatz mit 10 : 1-Teiler verwendet werden.



Grundsatz

Der 10 : 1-Tastkopf gestattet die Messung sehr großer Spannungen, weil das Eingangssignal im Verhältnis 10 : 1 geteilt wird.

1.2.1.3 Gleichrichter-Tastkopf

In der Nachrichtentechnik sind häufig modulierte Hochfrequenzspannungen zu messen. Auch hier kann vorteilhaft ein Tastkopf eingesetzt werden. Man baut dazu einen Hf-Gleichrichter ein, der unmittelbar nach der Messspitze das hochfrequente Signal gleichrichtet, so dass über die Messleitung lediglich die Nf-Spannung geführt wird. Damit stellt das Oszilloskop die «Umhüllende» der Hf-Spannung dar. Besonders hilfreich ist diese Methode bei der Messung der Durchlasskurve eines Filters (1.4.5). Das verwendete Oszilloskop braucht nicht für die Anzeige von Hf-Spannungen geeignet zu sein, es muss lediglich das Nf-Signal übertragen und abbilden.



Grundsatz

Tastköpfe mit Gleichrichter gestatten die Darstellung der «Umhüllenden» einer Hf-Spannung.

Bild 1.7 zeigt einen solchen Tastkopf und die Abbildung der modulierten Hf-Spannung über diesen Tastkopf.

Gleichrichtertastköpfe werden auch häufig mit hochohmigen Voltmetern kombiniert. Das Voltmeter zeigt dann die durch Gleichrichtung der Wechselspannung gewonnene Gleichspannung an. Solche Messanordnungen sind bis zu sehr hohen Frequenzen verwendbar.

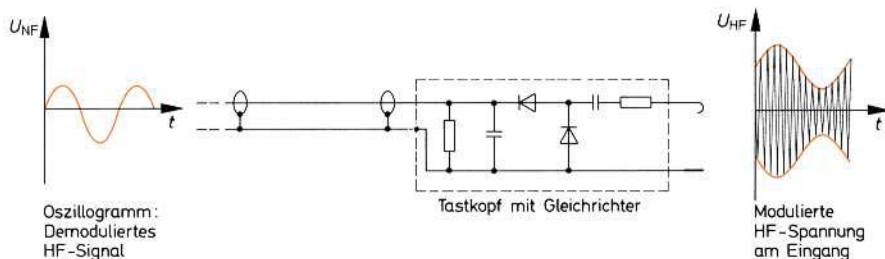


Bild 1.7 Aufbau eines Gleichrichter-Tastkopfes, modulierte Hf-Spannungen werden demoduliert

1.2.2 Abgleich von Tastköpfen

Die Signalübertragung von der Messspitze zum Eingang des Oszilloskops wird mit zunehmender Signalfrequenz immer schwieriger. Die Kapazitäten der Leitung und des Oszilloskops bewirken eine Tiefpasscharakteristik der Übertragung. Um möglichst breitbandige Übertragung zu gewährleisten, sind die Tastköpfe dem Oszilloskop angepasst. Es ist ratsam, immer nur die für das Oszilloskop vorgesehenen Tastköpfe zu verwenden. 1 : 1-Tastköpfe sind in der Regel fest abgestimmt und müssen bei Gebrauch nicht geeicht werden.

Tastköpfe mit Spannungsteiler enthalten dagegen meist einen Abgleichkondensator, der als Hochpass wirkt und die Tiefpasscharakteristik der Leitung und des Oszilloskop-Eingangs kompensiert (Bild 1.8).

Der Abgleich erfolgt mit Hilfe einer Rechteckspannung, die das Oszilloskop an einem besonderen Ausgang abgibt. Diese wird über den Tastkopf gemessen. Der Kondensator muss so eingestellt werden, dass das Oszillogramm eine einwandfreie Rechteckspannung zeigt (Bild 1.9).

Rechtecksignale können nur von sehr breitbandigen Übertragungssystemen unverzerrt übertragen werden. Unregelmäßigkeiten des Frequenzganges bei hohen Frequenzen wirken sich durch Veränderung der Rechteckflanke aus. Deshalb kann man die Form der Rechtecke als Kriterium für den Frequenzgang heranziehen.

Bei diesem Abgleichvorgang werden auch Frequenzgangfehler des Y-Verstärkers miterfasst. Deshalb muss u.U. der Abgleich erneut erfolgen, wenn der Y-Einschub gewechselt wird.

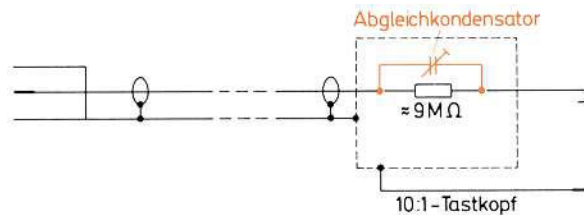


Bild 1.8
Frequenzgangabgleich
des 10 : 1-Tastkopfes

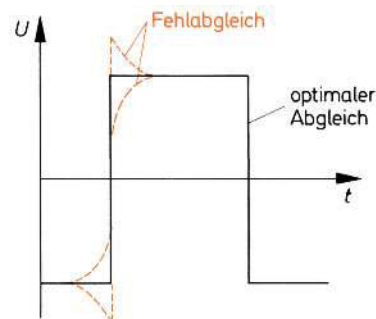


Bild 1.9
Tastkopfabgleich mit Hilfe einer Rechteckspannung

1.3 Ausführungsformen von Oszilloskopen

1.3.1 Zweistrahloszilloskop

Will man gleichzeitig zwei verschiedene Spannungsverläufe oszillographieren, z.B. Eingangs- und Ausgangsspannung einer Schaltung, so kann man dazu ein Zweistrahloszilloskop verwenden. Wie schon der Name sagt, hat hier die Oszillographenröhre zwei getrennte Strahlsysteme, die jeweils für sich über einen Y-Verstärker gesteuert werden. Diese relativ teureren Geräte haben den Vorteil, dass selbst Signale hoher Frequenz tatsächlich gleichzeitig sichtbar gemacht werden können. Die X-Ablenkung erfolgt meist für beide Systeme durch eine gemeinsame Zeitbasis. Es gibt jedoch auch Geräte, die mit zwei X-Kanälen ausgerüstet sind. Zweistrahloszilloskope werden in der Regel nur für spezielle Messzwecke eingesetzt.

1.3.2 Zweikanaloszilloskop

Auch mit diesem Gerät ist es gestattet, zwei verschiedene Funktionen abzubilden. Allerdings ist die Oszillographenröhre lediglich mit einem Strahlsystem ausgerüstet. Zwei Spannungen können deshalb nur in schneller Folge nacheinander dargestellt werden, so dass für den Betrachter der Eindruck entsteht, es handle sich um zwei gleichzeitige Bilder. Für jedes Eingangssignal besteht ein eigener Y-Verstärker, Kanal genannt. Die Ausgänge der Verstärker werden durch einen elektronischen Schalter wechselweise an das Y-Ablenksystem der Bildröhre gelegt.

1. Alternierender Betrieb (engl.: alternate = abwechselnd)
2. Chopper-Betrieb (engl.: chop = zerhacken)



Grundsatz

Im alternierenden Betrieb wird während eines Horizontaldurchlaufs der eine Kanal aufgeschaltet, während des nächsten Durchlaufes der andere Kanal.

Daraus ist ersichtlich, dass tatsächlich niemals beide Signale gleichzeitig abgebildet sind. Bei hohen Horizontalablenkfrequenzen ist das nicht wahrnehmbar, einerseits wegen der Nachleuchtzeit des Bildschirmes, zum anderen wegen der Trägheit des Auges.



Grundsatz

Der alternierende Betrieb ist vorzugsweise bei höheren Signalfrequenzen einzuschalten.

Ist die Horizontalablenkfrequenz sehr tief, z.B. bei der Zeitbasis 0,5 s/cm, dann werden die beiden Signale für den Betrachter nacheinander abgebildet, und es ist keine Vergleichsmöglichkeit mehr gegeben. Hier versagt der alternierende Betrieb. Man schaltet auf Chopper-Betrieb um.

Grundsatz

Im Chopper-Betrieb werden die Signale «zerhackt» und nur stückweise abgebildet.



Dies geschieht so, dass der elektronische Schalter mit einer hohen Frequenz fortwährend von einem Kanal zum anderen umschaltet. Auf diese Weise springt der Elektronenstrahl während eines Horizontaldurchlaufes viele Male zwischen den Signalwerten hin und her. Übliche Chopper schalten ein Signal immer für ca. $0,5 \mu\text{s}$ auf das Ablenssystem. Das entspricht einer Frequenz von 1 MHz. Die Sprünge von einem Signal zum anderen sind so schnell, dass sie auf dem Bildschirm nicht abgebildet werden.

Grundsatz

Der Chopper-Betrieb ist besonders geeignet für die Abbildung tiefer Frequenzen, da hier die Horizontalablenkung so langsam erfolgt, dass die $0,5\text{-}\mu\text{s}$ -Lücken nicht aufgelöst werden.



Nachteile hat der Chopperbetrieb bei hohen Horizontalablenkfrequenzen. Hier erscheint das Signal «zerhackt» (Bild 1.10). Die Pfeile in Bild 1.10 deuten die Sprünge des Elektronenstrahls an.

Je höher die Chopper-Frequenz eines Oszilloskops ist, desto höherfrequente Signale können im Chopperbetrieb abgebildet werden. Nach dem Chopper-Prinzip können auch Oszilloskope mit mehr als 2 Kanälen gebaut werden. Es sind Geräte mit 7 Kanälen im Handel. In der Regel haben Mehrkanal-Oszilloskope immer eine Umschaltmöglichkeit von alternierendem auf Chopper-Betrieb.

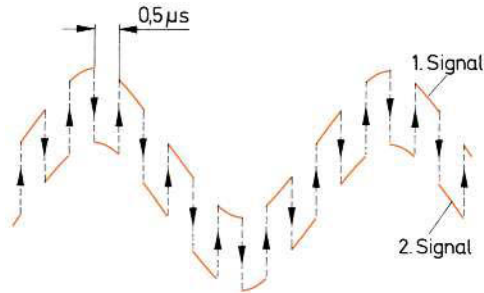


Bild 1.10
Darstellung von 2 Signalen mit einem
Zweikanaloszilloskop im Chopperbetrieb

1.3.3 Speicheroszilloskop

In der Impulstechnik müssen häufig Schaltungen untersucht werden, die nichtperiodische Spannungen verarbeiten. Zur Auswertung solcher Signale können herkömmliche Oszilloskope nicht verwendet werden. Denn sie liefern ein stehendes Bild nur deshalb, weil der Elektronenstrahl periodisch immer den gleichen Bildausschnitt zeigt. Für diese Messaufgaben sind spezielle Oszilloskope entwickelt worden.

Allgemein spricht man von Speicheroszilloskopen, denn ihre Funktion beruht auf einem elektronischen Speichervorgang. Man unterscheidet dabei zwischen den Analog-Speicheroszilloskopen und den heute üblicherweise verwendeten Digital-Speicheroszilloskopen.

1.3.3.1 Analog-Speicheroszilloskop

Als Beispiel soll hier das Prinzip einer Sichtspeicherröhre kurz erläutert werden. Die Röhre (Bild 1.11) besitzt ein Strahlensystem, das den sog. Schreibstrahl erzeugt. Dieser entspricht dem Elektronenstrahl üblicher Oszillographenröhren und wird auch so in Y- und X-Richtung gesteuert. Die Röhre erzeugt außerdem den sog. Lesestrahl, der speziell für die Speicherfunktion wichtig ist.

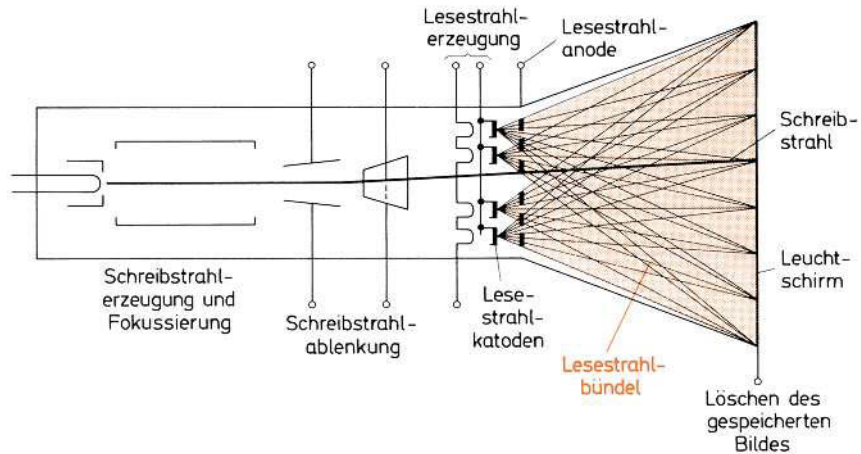


Bild 1.11 Schematische Darstellung einer Sichtspeicherröhre

Der Lesestrahl ist kein Einzelstrahl, sondern ein Bündel. Er wird von mehreren Glühkatoden erzeugt und ist so breit, dass er den gesamten Bildschirm gleichmäßig überdeckt. Die Elektronen des Schreibstrahls werden durch eine hohe Spannung zwischen Schreibstrahlkatode und -anoden so stark beschleunigt, dass sie beim Auftreffen auf den Leuchtschirm durch Sekundäremission von Elektronen eine stark positiv geladene Spur, das Oszillogramm, hinterlassen. Die Elektronen des Lesestrahls dagegen sind durch eine kleine Spannung zwischen Lesestrahlanoden und -katode nur wenig beschleunigt. Der Leuchtschirm besteht aus einer sehr dünnen schwach leitenden Oxidschicht, die auf der Strahlseite mit dem Leuchtstoff bedeckt ist. Dieser ist ein Isolator und dient gleichzeitig als Ladungsspeicher. Die langsamen Elektronen des Lesestrahls gelangen auf den isolierenden Leuchtschirm und laden ihn negativ auf, bis schließlich keine Elektronen mehr landen können, wenn der Leuchtschirm das Potential der Lesestrahlkatode erreicht hat. Zu der positiv geladenen Spur des Schreibstrahls werden die Lesestrahlelektronen jedoch stark beschleunigt, so dass sie ihrerseits hier Elektronen herausschlagen können und die positive Aufladung erhalten bleibt. Der Lesestrahl sorgt nun auch ohne Schreibstrahl durch einen kontinuierlichen «Elektronenbeschuss» der positiven Spur für ein dauerndes Leuchten der Spur: Das Bild ist gespeichert und bleibt lange Zeit erhalten, bis schließlich über den Restwiderstand des Isolators allmählich ein Ladungsausgleich eintritt. Die Spur wird dann immer breiter, und das Bild verwischt.

Über die leitende Trägerschicht des Leuchtschirms kann das Bild durch negative Ladung der positiven Spur wieder gelöscht werden.

1.3.3.2 Digitalspeicheroszilloskop

Mit den Fortschritten in der Herstellung schneller und genauer Analog-Digital-Umsetzer (ADU) und Digital-Analog-Umsetzer (DAU) sowie von schnellen RAM-Speichern ist das Analog-mehr und mehr vom Digitalspeicheroszilloskop verdrängt worden. Es gehört heute zum Standard in der Oszilloskop-Messtechnik. Der Aufwand für das digital speichernde Gerät ist zwar vergleichsweise größer, hat aber doch zwei ganz wesentliche Vorzüge: Die Speicherzeit ist praktisch unbegrenzt und es kann mit anderen digitalen Messgeräten in ein Messsystem integriert werden.

Grundprinzip

Bild 1.12a (s. Faltblatt im Anhang) zeigt das Funktionsschaltbild eines Digitalspeicheroszilloskops. Die analoge Eingangsspannung wird verstärkt und mit einem ADU digitalisiert. Die so entstehenden Datenwörter werden nacheinander in einen RAM-Speicher geschrieben. Der Speicher enthält nun die Daten für ein Oszillogramm. Um das auf dem Bildschirm sichtbar zu machen, werden die Daten mittels DAU wieder in Analogwerte zurückgewandelt und abgebildet.

Der RAM-Speicher kann, ähnlich einem Schieberegister, den Speicherinhalt permanent im Ring zirkulieren lassen, so dass auf dem Bildschirm immer der gleiche Bildausschnitt erscheint, also ein stehendes Bild entsteht. Das gespeicherte Oszillogramm bleibt erhalten, bis der Speicherinhalt erneuert wird.

Die sehr vielseitigen Anwendungsmöglichkeiten des Digitalspeicheroszilloskops, vom einfachen bis hin zum automatisierten Messplatz, bringen es mit sich, dass es eine Vielzahl von Ausführungen gibt. Hier kann nur auf die Grundstruktur eingegangen werden. Bild 1.12b (s. Faltblatt im Anhang) zeigt ein vereinfachtes Blockschaltbild. Es handelt sich um ein 2-Kanal-Ozilloskop mit der Möglichkeit der Fernsteuerung über den IEC-625-Messbus. Wegen der großen Zahl an Steuerungsfunktionen werden diese meist von einem Mikroprozessor übernommen. Er überwacht die Bedienelemente an der Frontplatte und bedient entsprechende Schalter und Kontakte über den Systembus. Im Fall der Fernsteuerung übernimmt er gemeinsam mit der Interfacebaugruppe die Koordinierung des Datenverkehrs.

Bild 1.12 Digitalspeicheroszilloskop: a) Funktionsschaltbild; b) vereinfachtes Blockschaltbild (s. Faltblatt im Anhang des Buches nach dem Stichwortverzeichnis)

y -Kanäle

Die beiden Kanäle y_1 und y_2 sind am Eingang ähnlich gestaltet wie bei einem herkömmlichen Oszilloskop. Es gibt die Umschaltmöglichkeiten DC-AC-GND, um den Wechselspannungsanteil vom Signal abtrennen und die Nulllinie einstellen zu können. Über die Abschwächer-/Verstärkereinheit wird das Signal in kalibrierten Stufen dem Bildschirm angepasst. Zusätzlich erfolgt hier die Positionseinstellung in y -Richtung. Der nachfolgende Umschalter ist typisch für ein 2-Kanal-Ozilloskop mit den Darstellungsmöglichkeiten:

- | | |
|--|---|
| <input type="checkbox"/> y_1 und $\pm y_2$: | jeweils im Einkanalbetrieb, y_2 invertierbar, |
| <input type="checkbox"/> $y_1 \pm y_2$: | Addition und Subtraktion der Signale, |
| <input type="checkbox"/> Chopperbetrieb: | Zweikanalbetrieb mit ständigem Wechsel zwischen |

- y_1 und y_2 während des Strahldurchlaufs,
 □ alternierender Betrieb: y_1 und y_2 werden jeweils im Wechsel für einen ganzen Strahldurchlauf an die y -Platten geführt.

Die Verzögerungsleitung erfüllt den Zweck, die Schaltzeiten zu überbrücken, die zwischen Triggerstart und tatsächlichem Beginn des Strahldurchlaufs liegen; wichtig insbesondere bei Darstellung von steilen Flanken.

Vom analogen Eingangssignal werden mit einer schnellen Abtastschaltung, Sample-and-Hold, Proben genommen und gespeichert. Anschließend erfolgt die Analog-Digital-Umsetzung (ADU) der Probe in einen Digitalwert. Der ADU meldet das Ende der Umsetzung über das Signal EOC (End of Conversion) an die Steuerung, die dann das Datenwort in den Pre-Trigger-Speicher einliest. Häufig ist es eine 8-Bit-Dualzahl. In diesem Fall ist dann festgelegt, dass in y -Richtung insgesamt $2^8 = 256$ verschiedene Spannungswerte unterschieden werden können.



Grundsatz

Die analoge Eingangsspannung wird im y -Kanal von einer Sample-and-Hold-Schaltung abgetastet und mit einem ADU in einen Binärcode umgesetzt. Mit 8 Bit ergeben sich 256 Spannungswerte in y -Richtung des Bildschirms.

Pre-Triggerspeicher

Dieser Speicher wird im Blockschaltbild 1.12b (s. Anhang) aus einem 4-KByte-RAM (RAM: Random Access Memory, Schreib-Lese-Speicher) gebildet, d.h., es können maximal $4 \cdot 1024 = 4096$ verschiedene 8-Bit-Wörter oder Bytes des ADU gespeichert werden.

Wie der Name Pre-Triggerspeicher sagt, werden hier Werte gespeichert, die bereits vor dem Triggerzeitpunkt liegen. Über die Frontplatteneinstellung «Pre-Trigger» kann man wählen, wie viel Bildanteil vor der Triggerung angezeigt werden soll. Die üblichen Einstellungen sind 0%, 25%, 50%, 75%, 100%. D.h., bei 0% wird der Pre-Triggerspeicher gar nicht in Anspruch genommen, bei 100% wird er voll benutzt und das dargestellte Oszillogramm zeigt nur den Spannungsverlauf unmittelbar vor der Triggerung an. Die einzelnen Speicherplätze werden nacheinander vom Pre-Triggerspeicher-Adressenzähler aufgerufen. Das jeweilige ADU-Datenwort wird gespeichert. Der Adressenzähler beginnt seine Zählung bei 100% Pre-Trigger mit der Adresse 0, bei 75% mit der Adresse 1024, bei 50% mit Adresse 2048, bei 25% mit Adresse 3072 und bei 0% wird gar nicht mehr gezählt, er steht auf Adresse 4095. Bei Erreichen der höchsten Adresse beginnt die Zählung wieder von vorn mit der eingestellten Pre-Trigger-Anfangsadresse.



Grundsatz

Der Pre-Triggerspeicher dient der Darstellung von Spannungswerten, die vor dem Triggerzeitpunkt liegen.

Bevor ein Speicherplatz des RAM wieder neu beschrieben wird, erfolgt das Auslesen dieser Adresse und die Übernahme des Inhalts in einen 8-Bit-Zwischenspeicher (Latch). Von hier aus werden nun nacheinander die Pre-Triggerbytes an den Anzeigenspeicher weitergegeben, sobald ein Triggerstart erfolgt.

Anzeigespeicher und Bilddarstellung

Auch der Anzeigespeicher ist im Blockschaltbild 1.12b als 4-KByte-RAM ausgeführt. Die einzelnen RAM-Adressen (0...4095) werden vom Adressenzähler dieses Speichers angewählt. Zugleich dienen die binär codierten Adressen aber auch der Erzeugung einer Treppenspannung mit 4096 Spannungsstufen durch den x -Digital-Analog-Umsetzer (x -DAU). Die Treppenspannung wird als x -Ablenkspannung des Oszilloskops verwendet.

Der Anzeigespeicher wird mit den vom Pre-Triggerspeicher ausgegebenen Digitalwerten im Zählerrhythmus gefüllt, sobald ein Triggervorgang ausgelöst ist. Die Zähler von Pre-Trigger- und Anzeigespeicher arbeiten mit der gleichen Zählfrequenz. Bild 1.13 soll den Vorgang für den Fall eines 25% Pre-Triggers veranschaulichen.

In den Pre-Triggerspeicher werden ständig die Daten des ADU Adresse für Adresse abgelegt. Der Adressenzähler läuft zyklisch von 3072...4095. Die übrigen Speicherplätze (0...3071) sind bei 25% Pre-Triggeranteil ungenützt. Erfolgt nun eine Triggerung beispielsweise, wenn der Zähler gerade auf 3072 kommt, so wird das hier vom letzten Zählerdurchgang gespeicherte Datenwort zunächst in den Zwischenspeicher (Latch) abgegeben, bevor das im Zeitpunkt des Triggers ankommende ADU-Datenwort in Adresse 3072 eingespeichert wird. Vom Latch aus übernimmt der Anzeigespeicher nun in seiner Adresse 0 das «alte Datenwort». Dieser Vorgang wiederholt sich bis der Pre-Triggerzähler auf 4095 steht. Damit sind alle «alten Datenwörter» in den Anzeigespeicher eingeschrieben, er steht jetzt auf Adresse 1023. Wenn nun der Pre-Triggerzähler auf 3072 zurückspringt, befindet sich dort als Datenwort der zum Zeitpunkt der Triggerung ein gespeicherte Wert. Das bedeutet, von jetzt an übernimmt der Anzeigespeicher Datenwörter, die nach dem Triggerzeitpunkt im Pre-Triggerspeicher abgelegt wurden. Ist der Anzeigespeicher bei Erreichen der Adresse 4095 gefüllt, wird die Torschaltung geschlossen. Jetzt steht eine vollständige, gespeicherte Bildinformation zur Verfügung. Die Daten können nun aus dem RAM gelesen (beginnend mit Adresse 0) und vom y -DAU wieder in analoge Spannungswerte zurückgewandelt werden. Nach einer Glättung der Span-

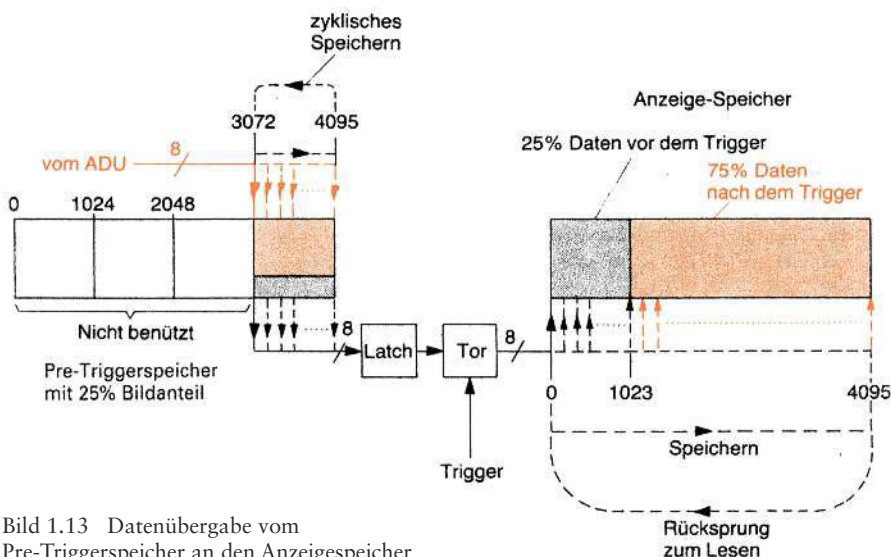


Bild 1.13 Datenübergabe vom Pre-Triggerspeicher an den Anzeigespeicher

nungssprünge durch das Smoothfilter (RC-Tiefpass) gelangt das analoge Signal über den y -Ablenkverstärker an die y -Platten. Da ja die x -Ablenkspannung vom Adressenzähler des Anzeigespeichers abgeleitet ist, also synchron mit den y -Spannungswerten läuft, wird der Inhalt des Anzeigespeichers genau im Bildbereich der Oszilloskopröhre als Spannungs-Zeit-Diagramm dargestellt. Bild 1.14 zeigt ein Oszillogramm, wie es sich mit 25% Pre-Triggeranteil darstellen könnte.

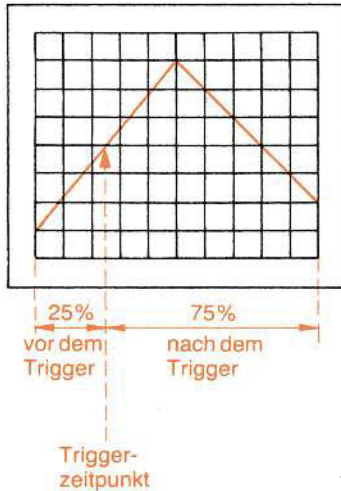


Bild 1.14 Oszillogramm mit 25% \triangleq $\frac{1}{4}$ Pre-Triggeranteil



Grundsatz

Der Anzeigespeicher ist ein RAM. Seine Speicherkapazität umfasst die y -Daten für ein Oszillogramm.

Der y -DAU setzt die gespeicherten Daten wieder in analoge Spannungswerte um.

Der entstehende Linienzug ist hier aus 4096 Einzelpunkten zusammengesetzt. Gewöhnlich werden die letzten 96 Bildpunkte bereits abgedunkelt, so dass der im Raster des Bildschirms befindliche Signalausschnitt 4000 Punkte umfasst. Bei 10 Rasterteilungen (Division) ergibt sich somit eine Punktdichte (Abtastdichte) in x -Richtung von 400 Samples/Division. Dies kann natürlich von Oszilloskop zu Oszilloskop verschieden sein.

Während der Auslesephase des Anzeigespeichers bleibt die Triggerung unterdrückt. Danach beginnt beim Eintreffen des nächsten Triggersignals zunächst wieder das Laden des Speichers bei Adresse 0 und anschließend das Auslesen, wenn der Speicher gefüllt ist. Der Pre-Triggerspeicher nimmt während dieser Vorgänge kontinuierlich die neuen Daten weiter auf.



Grundsatz

Die x -Ablenkspannung wird von einer Treppenspannung gebildet, deren Stufenzahl so groß ist wie die Zahl der Anzeigespeicherplätze.