

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	5
1 Grundbegriffe	15
1.1 Analoge und digitale Größendarstellung	15
1.1.1 Analoge Größendarstellung	15
1.1.2 Digitale Größendarstellung	17
Vorteile der digitalen Signale	18
1.2 Binäre und logische Zustände	19
1.3 Lernziel-Test	22
2 Logische Verknüpfungen	23
2.1 Grundfunktionen und Grundgatter (Grundelemente)	23
2.1.1 UND-Verknüpfung (Konjunktion) und UND-Gatter (UND-Element)	23
2.1.2 ODER-Verknüpfung (Disjunktion) und ODER-Gatter (ODER-Element)	24
2.1.3 Verneinung (Negation) und NICHT-Gatter (NICHT-Element)	25
2.1.4 Grundgatter (Grundelemente)	26
2.2 Zusammengesetzte Gatter (Elemente)	27
2.2.1 NAND-Gatter (NAND-Element)	27
2.2.2 NOR-Gatter (NOR-Element)	28
2.2.3 ÄQUIVALENZ-Gatter (ÄQUIVALENZ-Element)	29
2.2.4 ANTIVALENZ-Gatter (EXKLUSIV-ODER-Gatter, XOR-Gatter)	30
2.2.5 Verknüpfungsmöglichkeiten bei Gattern mit 2 Eingängen	31
2.3 Gatter mit 3 und mehr Eingängen	33
2.4 Lernziel-Test	34
3 Schaltungsanalyse	37
3.1 Wahrheitstabelle und Digitalschaltung	37
3.1.1 Wahrheitstabelle einer Digitalschaltung mit 2 Eingängen	37
3.1.2 Wahrheitstabelle einer Digitalschaltung mit 3 Eingängen	38
3.2 Funktionsgleichung und Digitalschaltung	40
3.2.1 Bestimmung der Funktionsgleichung einer gegebenen Digitalschaltung	40
3.2.2 Darstellung einer Digitalschaltung nach gegebener Funktionsgleichung	42
3.3 Soll-Verknüpfung und Ist-Verknüpfung	43
3.3.1 Bestimmung der Ist-Verknüpfung	43
3.3.2 Fehlerbestimmung	45
3.4 Lernziel-Test	46
4 Schaltalgebra	49
4.1 Variable und Konstante	49
4.2 Grundgesetze der Schaltalgebra	50

4.3	Rechenregeln der Schaltalgebra	51
4.3.1	Theoreme	51
4.3.2	Kommutativgesetz und Assoziativgesetz	53
4.3.3	Distributivgesetz	54
4.3.4	De Morgansche Gesetze	56
4.3.5	Bindungsregel	58
4.4	NAND- und NOR-Funktion	59
4.5	Rechenbeispiele	64
4.6	Lernziel-Test	68
5	Schaltungssynthese	69
5.1	Aufbau von Verknüpfungsschaltungen nach vorgegebenen Bedingungen	69
5.2	Normalformen	72
5.2.1	Disjunktive Normalform (DNF)	72
5.2.2	Konjunktive Normalform (KNF)	75
5.3	Vereinfachung und Umformung der disjunktiven Normalform (DNF) mit Hilfe der Schaltalgebra	76
5.3.1	Vereinfachung der DNF	76
5.3.2	Umformung der DNF	78
5.4	KV-Diagramme	79
5.4.1	KV-Diagramme für 2 Variable	79
5.4.2	KV-Diagramme für 3 Variable	84
5.4.3	KV-Diagramme für 4 Variable	88
5.4.4	KV-Diagramme für 5 Variable	93
5.4.5	KV-Diagramme für mehr als 5 Variable	96
5.5	Berechnung von Verknüpfungsschaltungen	97
5.5.1	Allgemeine Hinweise	97
5.5.2	Digitale Wechselschaltung	97
5.5.3	2-aus-3-Schaltung	99
5.5.4	Geradeschaltung	101
5.5.5	Schwellwertschaltung	103
5.5.6	Vergleichsschaltung (Komparator)	105
5.5.7	Transistor-Sortierschaltung	106
5.6	Aufgaben zum Schaltungsentwurf	107
5.6.1	Steuerschaltung	108
5.6.2	Ungeradeschaltung	108
5.6.3	Majoritätsschaltung	109
5.6.4	Verriegelungsschaltung	109
5.6.5	Flugabwehr-Auslöseschaltung	110
5.7	Zustandsdiagramme	110
5.8	Lernziel-Test	114
6	Schaltkreisfamilien	117
6.1	Allgemeines	117
6.2	Binäre Spannungspegel	119
6.3	Positive und negative Logik	121
6.4	Schaltungseigenschaften	123
6.4.1	Leistungsaufnahme	123
6.4.2	Pegelbereiche und Übertragungskennlinie	124

6.4.3	Schaltzeiten	125
6.4.4	Lastfaktoren	127
6.4.5	Störsicherheiten	128
6.4.6	Wired-Verknüpfungen	129
6.5	DTL-Schaltungen	131
6.5.1	Allgemeines	131
6.5.2	Standard-DTL-Schaltungen	131
6.5.3	LSL-Schaltungen	134
6.6	TTL-Schaltungen	137
6.6.1	Aufbau und Arbeitsweise von TTL-Gattern	137
6.6.2	Standard-TTL	143
6.6.2.1	Schaltungen	144
6.6.2.2	Grenzdaten und Kenndaten	146
6.6.2.3	Kennlinien	149
6.6.2.4	Leistungsbedarf	155
6.6.3	Low-Power-TTL (LTTL)	155
6.6.4	High-Speed-TTL (HTTL)	156
6.6.5	Schottky-TTL (STTL)	157
6.6.6	Low-Power-Schottky-TTL (LSTTL)	158
6.6.7	Advanced-Schottky-TTL (ASTTL)	159
6.6.8	Advanced-Low-Power-Schottky-TTL (ALSTTL)	159
6.6.9	Zusammenstellung wichtiger Eigenschaften	159
6.7	ECL-Schaltungen	160
6.8	MOS-Schaltungen	164
6.8.1	Gefahr durch statische Aufladung	165
6.8.2	PMOS	165
6.8.3	NMOS	168
6.8.4	CMOS	169
6.8.5	Highspeed-CMOS (HCMOS)	176
6.8.6	HCTMOS	176
6.8.7	Advanced-CMOS (ACMOS)	177
6.8.8	Verlustleistungen TTL-CMOS	177
6.8.9	Kombinierte Bausteine (BiCMOS)	177
6.8.10	Low-Voltage-Technology (LVT)	177
6.9	Lernziel-Test	178
7	Zeitabhängige binäre Schaltungen	181
7.1	Allgemeines	181
7.2	Klassifizierung der Flipflop-Arten	185
7.3	Nicht-taktgesteuerte Flipflops	188
7.3.1	NOR-Flipflop (NOR-Latch)	188
7.3.2	NAND-Flipflops (NAND-Latch)	189
7.4	Taktzustandsgesteuerte Flipflops	190
7.4.1	SR-Flipflop	190
7.4.2	SR-Flipflop mit dominierendem R-Eingang	193
7.4.3	E-Flipflop	194
7.4.4	D-Flipflop	194
7.4.5	Datenblätter	195
7.5	Taktflankengesteuerte Flipflops	195
7.5.1	Impulsgatter	197

7.5.2	Einflankengesteuerte SR-Flipflops	198
7.5.3	Einflankengesteuerte T-Flipflops	201
7.5.4	Einflankengesteuerte JK-Flipflops	202
7.5.5	Einflankengesteuerte D-Flipflops	206
7.5.6	Zweiflankengesteuerte SR-Flipflops	208
7.5.7	Zweiflankengesteuerte JK-Flipflops	210
7.5.8	Weitere Flipflop-Schaltungen	214
7.6	Zeitablauf-Diagramme	215
7.7	Charakteristische Gleichungen	219
7.8	Monostabile Kippstufen	224
7.9	Verzögerungsgatter	229
7.10	Lernziel-Test	233
8	Binäre Codes und Zahlensysteme	237
8.1	Allgemeines	237
8.2	Duales Zahlensystem	237
8.2.1	Aufbau des dualen Zahlensystems	237
8.2.2	Umwandlung von Dualzahlen in Dezimalzahlen	239
8.2.3	Umwandlung von Dezimalzahlen in Dualzahlen	239
8.2.4	Dualzahlen mit Kommastellen	240
8.2.5	Addition von Dualzahlen	242
8.2.6	Subtraktion von Dualzahlen	243
8.2.6.1	Direkte Subtraktion	243
8.2.6.2	Subtraktion durch Addition des Komplements	243
8.2.7	Negative Dualzahlen	247
8.3	BCD-Code	249
8.3.1	Zahlendarstellung im BCD-Code	249
8.3.2	Addition im BCD-Code	250
8.3.3	Subtraktion im BCD-Code	252
8.4	Weitere Tetraden-Codes	254
8.4.1	3-Exzess-Code	254
8.4.2	Aiken-Code	256
8.4.3	Gray-Code	258
8.5	Hexadezimals Zahlensystem	260
8.5.1	Aufbau des Hexadezimalsystems	260
8.5.2	Umwandlung von Hexadezimalzahlen in Dezimalzahlen	261
8.5.3	Umwandlung von Dezimalzahlen in Hexadezimalzahlen	262
8.5.4	Umwandlung von Dualzahlen in Hexadezimalzahlen	264
8.5.5	Umwandlung von Hexadezimalzahlen in Dualzahlen	266
8.6	Oktales Zahlensystem	267
8.6.1	Aufbau des Oktalsystems	267
8.6.2	Umwandlung von Oktalzahlen	268
8.7	Codierung von Textzeichen	271
8.7.1	Codes fester Wortlänge (Blockcodes)	271
8.7.2	Codes variabler Wortlänge (Shannon-Fano-Code, Huffman-Code)	272
8.7.3	Rasterorientierte Codes	276
8.8	Fehlererkennende Codes	277
8.8.1	Begriff der Redundanz	277
8.8.2	Dualergänzter Code	278

8.8.3	2-aus-5-Codes	279
8.8.4	3-aus-5-Codes	280
8.8.5	2-aus-7-Codes	281
8.9	Fehlerkorrigierende Codes	282
8.9.1	Arbeitsweise	282
8.9.2	Hamming-Code	283
8.10	Lernziel-Test	286
9	Code- und Pegel-Umsetzerschaltungen	291
9.1	Code-Umsetzer	291
9.1.1	Berechnung von Code-Umsetzern	291
9.1.2	Dezimal-BCD-Code-Umsetzer	293
9.1.3	BCD-Dezimal-Code-Umsetzer	295
9.1.4	Dezimal-3-Exzess-Code-Umsetzer	299
9.1.5	3-Exzess-Dezimal-Code-Umsetzer	300
9.1.6	Dezimal-7-Segment-Code-Umsetzer	301
9.1.7	BCD-7-Segment-Code-Umsetzer	303
9.2	Pegelumsetzer	309
9.2.1	Allgemeines	309
9.2.2	Aufbau von Pegelumsetzern	310
9.3	Lernziel-Test	312
10	Zähler und Frequenzteiler	313
10.1	Zählen und Zählerarten	313
10.2	Asynchrone Zähler	315
10.2.1	Asynchrone Dualzähler	315
10.2.1.1	Dual-Vorwärtszähler	315
10.2.1.2	Dual-Rückwärtszähler	321
10.2.1.3	Dualzähler mit umschaltbarer Zählrichtung	324
10.2.2	Asynchrone BCD-Zähler	326
10.2.2.1	BCD-Vorwärtszähler	326
10.2.2.2	BCD-Rückwärtszähler	329
10.2.2.3	BCD-Zähler mit umschaltbarer Zählrichtung	330
10.2.3	Asynchrone Dekadenzähler	331
10.2.3.1	BCD-Dekadenzähler	331
10.2.3.2	Andere Dekadenzähler	332
10.2.4	Asynchrone Modulo- n -Zähler	332
10.2.4.1	Prinzip der Modulo- n -Zähler	332
10.2.4.2	Modulo-5-Zähler	332
10.2.4.3	Modulo-60-Zähler	334
10.2.4.4	Modulo-13-Zähler mit Wartepflicht	335
10.2.5	Asynchrone Vorwahlzähler	335
10.2.6	Asynchrone Zähler für den Aiken-Code	336
10.2.7	Asynchrone Zähler für den 3-Exzess-Code	336
10.3	Synchronzähler	337
10.3.1	Das Synchronprinzip	337
10.3.2	Synchrone Dualzähler	338
10.3.2.1	Dual-Vorwärtszähler	338
10.3.2.2	Dual-Rückwärtszähler	340
10.3.2.3	Dualzähler mit umschaltbarer Zählrichtung	340

10.3.3	Berechnung von Synchronzählern	342
10.3.3.1	Berechnungsverfahren	342
10.3.3.2	Berechnungsbeispiel	343
10.3.4	Synchrone BCD-Zähler	349
10.3.4.1	Berechnung eines Synchron-BCD-Vorwärtszählers	349
10.3.4.2	Synchron-BCD-Vorwärtszähler als integrierte Schaltung	353
10.3.5	Synchron-Zähler für den 3-Exzess-Code	354
10.4	Frequenzteiler	359
10.4.1	Asynchrone Frequenzteiler mit festem Teilverhältnis	359
10.4.2	Synchrone Frequenzteiler mit festem Teilverhältnis	362
10.4.3	Frequenzteiler mit einstellbarem Teilverhältnis	363
10.5	Lernziel-Test	363
11	Digitale Auswahl- und Verbindungsschaltungen	365
11.1	Datenselektor, Multiplexer, Demultiplexer	365
11.1.1	4-Bit-zu-1-Bit-Datenselektor	366
11.1.2	2 × 4-Bit-zu-4-Bit-Datenselektor	366
11.1.3	4 × 8-Bit-zu-8-Bit-Datenselektor	367
11.1.4	16-Bit-zu-1-Bit-Datenselektor-Multiplexer	368
11.1.5	1-Bit-zu-4-Bit-Demultiplexer	370
11.2	Adressdecodierer	371
11.2.1	2-Bit-Adressdecodierer	372
11.2.2	4-Bit-Adressdecodierer	372
Bild 11.14	4-Bit-Adressdecodierer mit Wahrheitstabelle	373
11.3	Digitaler Komparator	373
11.3.1	1-Bit-Komparator	374
11.3.2	3-Bit-Komparator für den BCD-Code	374
11.3.3	4-Bit-Komparator für den Dual-Code	377
11.4	Busschaltungen	379
11.4.1	Aufbau und Arbeitsweise	379
11.4.2	Bussysteme	381
11.4.3	Anwendungen	383
11.4.3.1	Computerbusse	383
11.4.3.2	Feldbusse	384
11.4.3.3	Fahrzeugbusse	385
11.4.3.4	Installationsbusse	385
12	Register- und Speicherschaltungen	387
12.1	Schieberegister	387
12.1.1	Schieberegister für serielle Ein- und Ausgabe	387
12.1.2	Schieberegister mit Parallelausgabe	391
12.1.3	Schieberegister mit Parallelausgabe und Paralleleingabe	392
12.1.4	Ringregister	393
12.1.5	Schieberegister mit umschaltbarer Schieberichtung	394
12.2	Speicherregister	396
12.3	Schreib-Lese-Speicher (RAM)	397
12.3.1	Statische RAM (SRAM)	397
12.3.1.1	RAM-Speicherelement in TTL-Technik	397

12.3.1.2	RAM-Speicherelement in MOS-Technik	399
12.3.1.3	Aufbau einer RAM-Speichermatrix	400
12.3.2	Dynamische RAM (DRAM)	401
12.3.2.1	Speicherelement eines dynamischen RAM	401
12.3.2.2	Besonderheiten dynamischer RAM	402
12.3.2.3	SDRAM und DDR-SDRAM	403
12.3.3	Speicheraufbau und Speicherkenngrößen	403
12.3.3.1	Speicheraufbau	403
12.3.3.2	Speicherkenngrößen	406
12.4	Festwertspeicher (ROM)	407
12.5	Programmierbarer Festwertspeicher (PROM)	409
12.6	Löschbare programmierbare Festwertspeicher	410
12.6.1	Festwertspeicher EPROM und REEPROM	411
12.6.2	Festwertspeicher EEROM (EEPROM) und E ² ROM	414
12.7	Flash-Speicher	415
12.7.1	Langzeit-Datensicherheit (Retention)	416
12.7.2	Endurance	416
12.8	Lernziel-Test	416
13	Digital-Analog-Umsetzer, Analog-Digital-Umsetzer	419
13.1	Digital-Analog-Umsetzer	419
13.1.1	Prinzip der Digital-Analog-Umsetzung	419
13.1.2	DA-Umsetzer mit gestuften Widerständen	421
13.1.3	R/2R-DA-Umsetzer	422
13.2	Analog-Digital-Umsetzer	424
13.2.1	Abtastung (Sampling)	425
13.2.2	Überabtastung (Oversampling)	429
13.2.3	Quantisierung (Sampletiefe)	430
13.2.4	Abtast-Halte-Schaltung (Sample-and-Hold)	431
13.2.5	Genauigkeit	432
13.2.6	Rauschformung (Noise Shaping)	432
13.2.7	AD-Umsetzer nach dem Sägezahnverfahren	433
13.2.8	AD-Umsetzer nach dem Dual-Slope-Verfahren	434
13.2.9	AD-Umsetzer nach dem Kompensationsverfahren	436
13.2.10	AD-Umsetzer nach dem Spannungs-Frequenz-Verfahren	438
13.2.11	AD-Umsetzer nach dem Direktverfahren (Parallel- oder Flashkonverter)	439
13.2.12	Sigma-Delta-Umsetzer	441
13.3	Datenkompression	442
13.4	Lernziel-Test	443
14	Rechenschaltungen	445
14.1	Halbaddierer	445
14.2	Volladdierer	447
14.3	Paralleladdierschaltung	451
14.4	Serielle Addierschaltung	452
14.5	Subtrahierschaltungen	454
14.5.1	Halbsubtrahierer	454
14.5.2	Vollsubtrahierer	455
14.5.3	4-Bit-Subtrahierschaltung	457

14.5.4	Subtrahierschaltung mit Volladdierern	458
14.6	Addier-Subtrahier-Werk	459
14.7	Multiplikationsschaltungen	463
14.7.1	Parallel-Multiplikationsschaltung	463
14.7.2	Serielle Multiplikationsschaltung	466
14.8	Lernziel-Test	468
15	Mikroprozessoren und Mikrocomputer	469
15.1	Der Mikroprozessor als Universalschaltung	469
15.2	Arithmetisch-logische Einheit (ALU)	469
15.3	Akkumulator	473
15.4	Akkumulator mit Datenspeicher	475
15.5	Programmgesteuerter vereinfachter Rechner	477
15.6	Mikroprozessorbausteine	479
15.6.1	Prozessorarchitekturen	479
15.6.2	CISC und RISC	481
15.6.3	Digitale Signalprozessoren (DSP)	482
15.6.4	Mikroprozessortypen	482
15.6.5	Funktionsweise eines Mikroprozessors	484
15.6.5.1	Steuerwerk	484
15.6.5.2	Rechenwerk	485
15.6.5.3	Speicher	485
15.6.5.4	Interner Datenbus	486
15.6.5.5	Adressbus	486
15.6.6	Mikroprozessor SAB 8080 A	486
15.6.7	Zusatzbausteine für Mikroprozessoren	490
15.6.7	Verbesserungen der Mikroprozessoren	492
15.6.7.1	Erhöhung der Taktfrequenz	492
15.6.7.2	Speicherhierarchien	493
15.6.7.3	Parallelverarbeitung	494
15.7	Mikrocomputer	495
15.8	Mikrocontroller	496
15.9	Lernziel-Test	499
16	Programmierbare Logikschaltungen	501
16.1	Herstellerprogrammierte Logikschaltungen	501
16.2	Anwenderprogrammierbare Logikschaltungen	503
16.2.1	Grundlagen	503
16.2.2	PAL-Schaltungen	506
16.2.3	GAL-Schaltungen	510
16.2.4	FPLA-Schaltungen	514
16.2.5	PROM-Schaltungen	516
16.3	PLD-Typen	517
16.4	Programmierung von PLD	518
16.5	Lernziel-Test	520
17	Lösungen der Aufgaben der Lernziel-Tests	523
	Stichwortverzeichnis	543

1 Grundbegriffe

1.1 Analoge und digitale Größendarstellung

Die Begriffe «analog» und «digital» kommen aus der Rechentechnik und wurden dann für die gesamte Elektrotechnik einschließlich der Messtechnik übernommen.

1.1.1 Analoge Größendarstellung

Für die Darstellung von Größen nach dem Analogprinzip benötigt man eine *Analogiegröße*, das heißt eine «entsprechende» Größe. Bei Analogrechnern ist die Analogiegröße die elektrische Spannung. Für die Zahlendarstellung gilt zum Beispiel:

Definition

Der Zahl 1 wird der Wert 1 V zugeordnet.

$1 \triangleq 1 \text{ V}$ (\triangleq bedeutet «entspricht»).

Dann entsprechen 2 V der Zahl 2 und 3,6 V der Zahl 3,6. Will man die Zahl 4,365 darstellen, benötigt man eine Spannung von 4,365 V. Zur Darstellung größerer Zahlen muss eine andere Zuordnung, also ein anderer Maßstab gewählt werden, z.B. $1 \triangleq 1 \text{ mV}$. Man käme sonst in Bereiche zu hoher Spannung.

Grundsatz

Analoge Größen sind Werte der Analogiegröße, die innerhalb eines zulässigen Bereichs jeden beliebigen Wert annehmen dürfen.

Die Genauigkeit der Darstellung analoger Größen hängt davon ab, mit welcher Genauigkeit die Analogiegröße gemessen werden kann. Man stößt hier schnell an physikalische Grenzen. Eine Spannung kann mit normalem Aufwand auf $\pm 1\%$ genau, mit hohem Aufwand auf $\pm 1\%$ genau gemessen werden. Will man die Genauigkeit weiter steigern, wird der Aufwand extrem groß. Als weitere physikalische Grenze kommt die Temperaturabhängigkeit hinzu.

Grundsatz

Analoge Größen werden normalerweise nur auf 3 Dezimalstellen genau dargestellt.

Ein einfacher Analogrechner ist der altbewährte Rechenschieber. Als Analogiegröße verwendet man die Länge. Die Länge ist den Zahlenwerten in logarithmischem Maßstab zugeordnet. Die Zuordnung muss also nicht linear sein. Die Genauigkeit des Rechenschiebers hängt von der Möglichkeit der genauen Ablesung ab.

In der Messtechnik nimmt die analoge Darstellung von Größen einen besonders großen Platz ein. Zeigermessgeräte stellen Messgrößen analog dar (Bild 1.1). Ana-

logiegröße ist der Winkel, den der Zeiger mit seiner Null-Linie bildet oder der entsprechende Skalenbogen. Der Zeiger kann jeden beliebigen Wert auf dem Skalenbogen anzeigen.

Mit Zeigern ausgestattete Uhren (Bild 1.2) zeigen die Zeit analog an. Analogiegröße ist auch hier der Winkel bzw. der zugehörige Bogen. Zulässiger Bereich ist der Vollkreis von 360° .

Schaubilder nach Bild 1.3 sind ebenfalls analoge Darstellungen. Analogiegröße ist hier die Balkenlänge.

Die übliche Darstellung von Spannungsverläufen im rechtwinkligen Koordinatensystem (Bild 1.4) ist ebenfalls eine analoge Darstellung. Die Spannung kann alle Werte innerhalb eines zulässigen Bereiches annehmen.



Grundsatz

Die analoge Größendarstellung hat den Vorteil großer Anschaulichkeit.

Bei der analogen Größendarstellung sind Aussagen über den Trend der Größenentwicklung möglich.

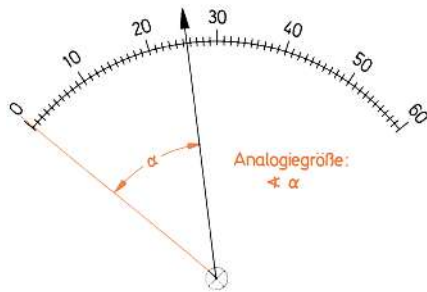


Bild 1.1 Analoge Darstellung von Messgrößen

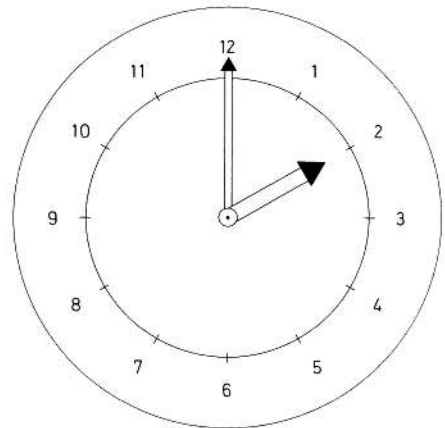


Bild 1.2 Analog anzeigende Uhr

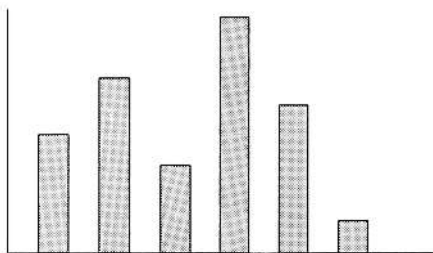
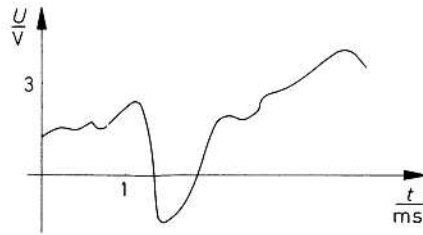


Bild 1.3
Analoge Darstellung, z.B. Einkommen
verschiedener Berufe

Bild 1.4
Analoge Darstellung eines
Spannungsverlaufs



Analoge Signale

Analoge Signale sind wertkontinuierlich, d.h., innerhalb eines Messbereiches können beliebig viele verschiedene Amplituden auftreten. Natürlich ist der Messbereich aus physikalischen Gründen begrenzt (z.B. weil ein Sensor nur maximal 5 V liefert). Aber innerhalb dieses Bereiches können alle Amplitudenwerte auftreten. In Bild 1.4 liegen die Amplitudenwerte auf der Y-Achse ($U[V]$).

Ähnliches gilt für die Zeitpunkte, zu denen Messwerte vorliegen. Auch hier liegen in einer bestimmten Zeitspanne beliebig viele Messwerte vor. In Bild 1.4 liegen die Zeitpunkte auf der X-Achse ($t[ms]$). Signale, die zu jeder beliebigen Zeit einen Wert besitzen, werden zeitkontinuierlich genannt.

Grundsatz

Ein System, das zeit- und wertkontinuierliche Signale verarbeitet, arbeitet analog.



1.1.2 Digitale Größendarstellung

Bei der digitalen Größendarstellung verwendet man abzählbare Elemente. »Digital« kommt von digitus (lat.: der Finger). Eine Zahl kann z.B. durch eine Anzahl von Fingern dargestellt werden. Ein einfacher Digitalrechner ist der altbekannte Rechenrahmen (Bild 1.5). Eine Zahl wird durch die Anzahl der Kugeln dargestellt.

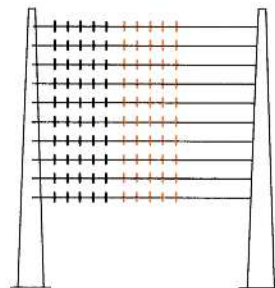


Bild 1.5
Rechenrahmen als einfacher »Digitalrechner«

Definition

Digitale Größen bestehen aus abzählbaren Elementen.



Ein Vorteil des Digitalprinzips wird hier bereits sichtbar. Der Genauigkeit der Darstellung von Zahlen und Größen ist keine physikalische Grenze gesetzt. Wenn man die Anzahl der Kugeln nur entsprechend erhöht, ist jede gewünschte Genauigkeit erreichbar.



Definition

Digitale Größen können mit beliebiger Genauigkeit dargestellt werden.

Bei elektronischen Digitalrechnern verwendet man statt der Kugeln elektrische Impulse. Man könnte die Zahl 3 z.B. durch 3 Impulse darstellen und entsprechend die Zahl 37 durch 37 Impulse. Diese Darstellung ist aber sehr unwirtschaftlich und daher nicht üblich. Zur Darstellung der Zahl 100 000 würde man 100 000 Impulse benötigen.

Will man Zahlen mit digitalen Signalen darstellen, verwendet man bestimmte Verabredungen, sog. Codes.

Digitale Signale

Beschränkt man sich beim Wertebereich auf eine endliche Anzahl von Werten, erhält man ein sogenanntes wertdiskretes Signal. Z.B. kann festgelegt werden, dass innerhalb des Messbereiches von 5 V nur 1-V-Schritte zugelassen werden. Aus dem Signal aus Bild 1.4 wird ein Signal mit einem stufigen Verlauf. Diese Umwandlung wird Quantisierung genannt. Bei der Umwandlung entsteht ein Fehler, der Quantisierungsfehler.



Definition

Wertdiskrete Signale werden digitale Signale genannt.

Durch Abtastung des Signals zu festgelegten Zeitpunkten entsteht aus dem zeitkontinuierlichen Signal ein zeitdiskretes Signal. Die Abtastung erfolgt in gleichmäßigen (äquidistanten) Abständen mit Hilfe eines Taktsignals.

Die abgetasteten Amplitudenwerte müssen für die Übertragung oder Speicherung codiert werden. In der Digitaltechnik wird hierfür meist der Binärcode verwendet. Jedem Amplitudenwert wird eine Zahlenfolge aus Nullen und Einsen zugeordnet, z.B.:

$$0 \text{ V} = 000, 1 \text{ V} = 001, 2 \text{ V} = 010, 3 \text{ V} = 011, 4 \text{ V} = 100, 5 \text{ V} = 101$$

Vorteile der digitalen Signale

Durch die Codierung mit 0 und 1 kann eine hohe Störsicherheit erreicht werden. Weist man z.B. bei der Übertragung digitaler Impulse mit Hilfe von Spannungspegeln der Dualzahl 0 den Bereich 0 V bis 1 V zu und der Dualzahl 1 den Bereich 4 V bis 5 V, dann verursachen Störungen mit Amplituden von z.B. 2,5 V keine Fehler. Sie werden nicht bewertet.

Ein digitales Signal ist in Bild 1.6 dargestellt. Es enthält nur die Spannungswerte 0 V und 5 V.

Digitale Signale sind beliebig oft reproduzierbar. Durch die Übertragung zusätzlicher Prüfsignale können Fehler erkannt und korrigiert werden. Dadurch ist die

Kopie nicht schlechter als das Original. Bei analogen Systemen pflanzt sich der Fehler beim Kopieren systematisch fort.

Die Fehlersuche in digitalen Systemen ist durch festgelegte Testalgorithmen oft einfacher.

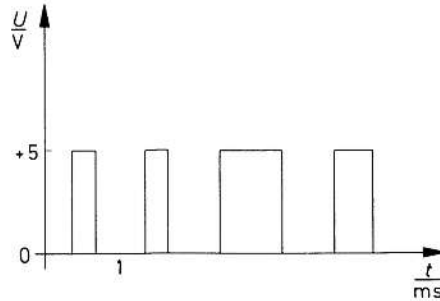


Bild 1.6
Zeitlicher Verlauf eines digitalen Signals

Da digitale Größen aus abzählbaren Elementen bestehen, verwendet man zur Veranschaulichung die Zahlendarstellung durch Ziffern.

Definition

Eine ziffernmäßige Anzeige wird »digitale Anzeige« genannt.



Messgeräte mit Ziffernanzeige heißen »digital anzeigende Messgeräte« (Bild 1.7). Uhren mit Ziffernanzeige werden als »Digitaluhren« bezeichnet.

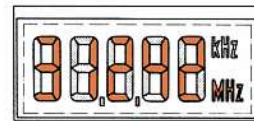


Bild 1.7
Digitalanzeige eines Messgerätes

Grundsatz

Digitale Anzeigen sind eindeutig.



Der Ablesende braucht nicht die letzte Stelle, wie bei der analogen Anzeige, abzuschätzen.

1.2 Binäre und logische Zustände

Eine digitale Größe besteht, wie wir im vorhergehenden Abschnitt gesehen haben, aus abzählbaren Elementen. Diese Elemente können zwei, drei oder auch mehr Zustände haben. In Bild 1.8 ist ein digitales Signal mit 3 möglichen Zuständen dargestellt. Diese Zustände entsprechen 10 V, 5 V und 0 V.



Definition

Digitale Signale können 2-, 3- oder auch mehrwertig sein; das heißt, sie können 2, 3 oder mehr vereinbarte Zustände haben.

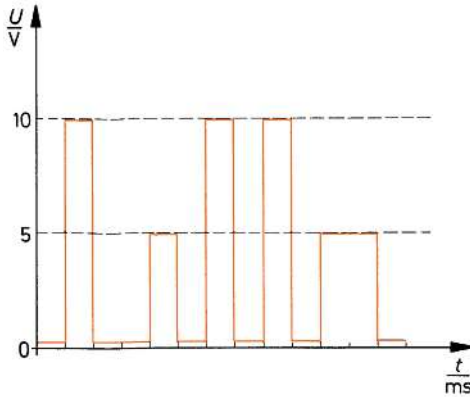


Bild 1.8
Digitales Signal mit
3 möglichen Zuständen

Man verwendet aber in der Digitaltechnik fast immer digitale Elemente mit nur 2 Zuständen. Eine Kugel im Rechenrahmen ist an bestimmter Stelle vorhanden oder nicht vorhanden. Es gibt nur diese beiden Möglichkeiten. Ein elektrischer Impuls ist vorhanden oder nicht vorhanden. Eine Spannung hat den vereinbarten oberen Wert oder den vereinbarten unteren Wert (mit einer gewissen Toleranz).



Definition

Die üblichen digitalen Elemente sind «zweiwertig», d.h., sie haben 2 mögliche Zustände.

Für die Eigenschaft der Zweiwertigkeit ist die Bezeichnung «binär» (von lateinisch: *bis* = zweimal) üblich. Die in der Digitaltechnik verwendeten Elemente sind also *binäre Elemente*.



Grundsatz

Da die Digitaltechnik nur binäre Elemente verwendet, müsste sie genauer «Binäre Digitaltechnik» genannt werden.

Entsprechend müsste für Digitalschaltungen auch die Bezeichnung «Binäre Digitalschaltungen» verwendet werden. Da es jedoch zur Zeit – zumindest im technischen Bereich – keine andere Digitaltechnik gibt, kann die Zusatzbezeichnung «binär» entfallen.

Die in der Digitaltechnik üblichen beiden binären Zustände werden auch digitale Zustände genannt.

Beispiele für binäre Zustände:

Erster binärer Zustand	Zweiter binärer Zustand
Schalter geschlossen	Schalter geöffnet
Impuls vorhanden	Impuls nicht vorhanden
Transistor leitend	Transistor gesperrt
Diode leitend	Diode gesperrt
Spannung hoch	Spannung niedrig
Strom hoch	Strom niedrig
Werkstoff magnetisch	Werkstoff nicht magnetisch

Da man in der Digitaltechnik elektronisch arbeitet, werden vor allem Spannungszustände als binäre Zustände verwendet. Die Hersteller geben für ihre Digitalschaltungen die binären Spannungszustände in den Datenbüchern an. Übliche binäre Spannungszustände:

+2 V	0 V (Masse)
+5 V	0 V (Masse)
+5 V	-5 V
+12 V	0 V
0 V	-12 V

Für die binären Spannungszustände gibt es bestimmte Toleranzen (Bild 1.9). Der eine binäre Zustand kann z.B. eine Spannung von 4...5,5 V haben. Die Spannung des anderen binären Zustands kann zwischen 0 V und +0,8 V liegen. Der niedrigere Spannungspegel wird mit L (von engl.: *low* = niedrig), der höhere Spannungspegel mit H (von engl.: *high* = hoch) bezeichnet.

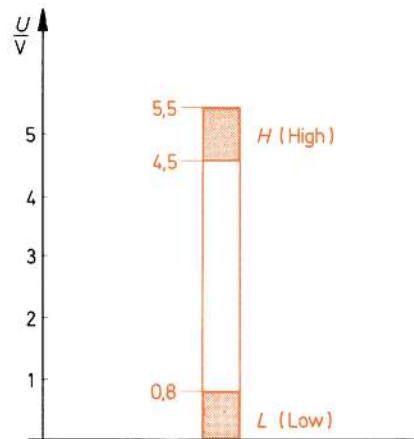


Bild 1.9
Toleranzfeld für
binäre Spannungszustände

Definition

L = Low = niedriger Pegel



Pegel, der näher bei minus unendlich ($-\infty$) liegt.



Definition

H = High = hoher Pegel

Pegel, der näher bei plus unendlich ($+\infty$) liegt.

Die binären Zustände haben für sich genommen noch keine Aussagekraft. Ihnen müssen sog. *logische Zustände* zugeordnet werden. Der logische Zustand 1 (1-Zustand) bedeutet in der mathematischen Logik «wahr» bzw. «zutreffend». Der logische Zustand 0 (0-Zustand) bedeutet «unwahr» bzw. «nicht zutreffend».



Definition

Die Zuordnung der binären Zustände zu den Logik-Zuständen ist beliebig.

Ist die Zuordnung einmal getroffen worden, muss sie konsequent beibehalten werden. Eine übliche Zuordnung ist:

$$\begin{aligned} 0 &\hat{=} L = 0 \text{ V (Masse)} \\ 1 &\hat{=} H = +5 \text{ V} \end{aligned}$$

Eine andere mögliche Zuordnung ist:

$$\begin{aligned} 0 &\hat{=} H = +5 \text{ V} \\ 1 &\hat{=} L = 0 \text{ V (Masse)} \end{aligned}$$

In Systemen, in denen die Logik-Zustände anderen Eigenschaften einer physikalischen Größe zugeordnet werden – z.B. positiven oder negativen Impulsen, dem Vorhandensein oder dem Nichtvorhandensein von Impulsen, zwei unterschiedlichen Frequenzen usw. –, dürfen H und L zum Darstellen dieser Eigenschaften verwendet werden. Selbstverständlich ist eine vorherige eindeutige Zuordnung erforderlich.

Es ist darauf zu achten, dass die binären Zustände (z.B. die Pegelangaben L und H) und die logischen Zustände nicht miteinander verwechselt werden. Die logischen Zustände werden auch «Werte» genannt.

1.3 Lernziel-Test

1. Wie unterscheidet sich eine digitale Größe von einer analogen Größe?
2. Nennen Sie Vor- und Nachteile der analogen Größendarstellung.
3. Was versteht man unter binären Größen?
4. Welche Genauigkeit ist bei der digitalen Größendarstellung erreichbar?
5. In den Datenbüchern der Hersteller digitaler Schaltungen werden oft die Bezeichnungen L und H angegeben. Welche Bedeutung haben diese Bezeichnungen?
6. Was sind logische Zustände, und durch welche Zeichen werden sie ausgedrückt?
7. Geben Sie an, wie Messgrößen
 - a) bei einem analog anzeigenden Messgerät,
 - b) bei einem digital anzeigenden Messgerät dargestellt werden.

2 Logische Verknüpfungen

2.1 Grundfunktionen und Grundgatter (Grundelemente)

2.1.1 UND-Verknüpfung (Konjunktion) und UND-Gatter (UND-Element)

Der Satz «Wenn morgen schönes Wetter ist und mein Bruder Zeit hat, gehen wir segeln» enthält eine *UND-Verknüpfung*. Die Aussage A (schönes Wetter) *und* die Aussage B (mein Bruder hat Zeit) müssen zutreffen, also wahr sein, damit die Aussage X (segeln gehen) wahr wird. Dieser Zusammenhang kann in einer Wahrheitstabelle dargestellt werden (Bild 2.1). Der Zustand 1 bedeutet «wahr» bzw. «zutreffend». Der Zustand 0 bedeutet «unwahr» bzw. «nicht zutreffend». Vier Fälle (Kombinationen) sind möglich. Die Reihenfolge der Fälle ist im Prinzip beliebig, sollte aber – wie später noch erläutert wird – einem bestimmten Schema entsprechen.

Fall	B	A	X
1	0	0	0
2	0	1	0
3	1	0	0
4	1	1	1

Bild 2.1 Wahrheitstabelle einer UND-Verknüpfung und eines UND-Gatters

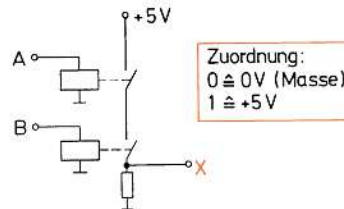


Bild 2.2 UND-Gatter

Eine elektronische Schaltung, bei der am Ausgang X nur dann Zustand 1 anliegt, wenn am Eingang A *und* am Eingang B die Zustände 1 anliegen, wird *UND-Gatter* genannt.

Ein UND-Gatter kann durch eine Schaltung nach Bild 2.2 verwirklicht werden. Man verwendet heute jedoch fast ausschließlich integrierte Halbleiterschaltungen (siehe Abschnitt «Schaltkreisfamilien»).

Definition

Jede Schaltung, die die Wahrheitstabelle einer UND-Verknüpfung erfüllt, ist ein UND-Gatter.

Die UND-Verknüpfung kann mathematisch mit Hilfe der Schaltalgebra ausgedrückt werden:

$$X = A \wedge B \quad \wedge \text{ Zeichen für die UND-Verknüpfung (genormt).}$$

In der Literatur findet man noch andere Zeichen für die UND-Verknüpfung. Die vorstehende Gleichung wird dann wie folgt geschrieben:

$$X = A \cdot B \quad X = A \& B$$

Die Schaltzeichen eines UND-Gatters mit 2 Eingängen zeigt Bild 2.3. Die Bezeichnungen der Eingänge und des Ausgangs sind beliebig. Man verwendet für die Eingänge auch gern E_1 , E_2 und für den Ausgang A.



Bild 2.3 Schaltzeichen des UND-Gatters mit 2 Eingängen



Definition

Am Ausgang eines UND-Gatters liegt nur dann der Zustand 1, wenn an allen Eingängen der Zustand 1 liegt.

2.1.2 ODER-Verknüpfung (Disjunktion) und ODER-Gatter (ODER-Element)

Der Satz «Wenn ich eine Erbschaft mache oder im Lotto gewinne, mache ich eine Weltreise» führt auf eine *ODER-Verknüpfung*. Die Weltreise wird gemacht, wenn die Aussage A (Erbschaft) oder die Aussage B (Lottogewinn) oder beide Aussagen wahr werden. Man könnte darüber streiten, ob die Weltreise auch gemacht wird, wenn beide Aussagen wahr werden. Die sprachliche Ausdrucksweise ist hier nicht exakt genug. Bei einer ODER-Verknüpfung müsste die Weltreise aber auch gemacht werden, wenn A und auch B wahr werden. Den Zusammenhang zeigt die Wahrheitstabelle Bild 2.4 (Zustand 1 $\hat{=}$ «wahr», Zustand 0 $\hat{=}$ «unwahr»).

Eine elektronische Schaltung, bei der am Ausgang X immer dann 1 anliegt, wenn am Eingang A oder am Eingang B oder an beiden Eingängen 1 anliegt, wird ODER-Gatter genannt. Ein ODER-Gatter kann durch eine Schaltung nach Bild 2.5 hergestellt werden.

Bild 2.4
Wahrheitstabelle einer ODER-Verknüpfung und eines ODER-Gatters

Fall	B	A	X
1	0	0	0
2	0	1	1
3	1	0	1
4	1	1	1

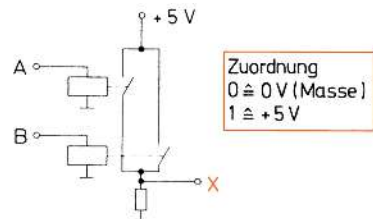


Bild 2.5
ODER-Gatter

Die Relaisschaltung dient nur zur besseren Anschaulichkeit. ODER-Gatter werden heute fast ausschließlich als integrierte Halbleiterschaltungen aufgebaut.

Definition

Jede Schaltung, die die Wahrheitstabelle einer ODER-Verknüpfung erfüllt, ist ein ODER-Gatter.



Die ODER-Verknüpfung kann mathematisch ebenfalls mit Hilfe der Schaltalgebra ausgedrückt werden:

$$X = A \vee B \quad \vee \text{ Zeichen für die ODER-Verknüpfung (genormt).}$$

Außer dem genormten Zeichen für die ODER-Verknüpfung wird vor allem in der älteren Literatur das Pluszeichen verwendet. Die Gleichung lautet dann:

$$X = A + B.$$

Die Schaltzeichen eines ODER-Gatters mit 2 Eingängen zeigt Bild 2.6. Die Angabe im genormten Schaltzeichen ≥ 1 bedeutet, dass die Anzahl der 1-Zustände an den Eingängen ≥ 1 sein muss, wenn am Ausgang 1 anliegen soll.

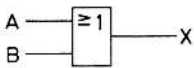


Bild 2.6 Schaltzeichen des ODER-Gatters mit 2 Eingängen

Definition

Am Ausgang eines ODER-Gatters liegt immer dann der Zustand 1, wenn wenigstens an einem Eingang der Zustand 1 anliegt.



2.1.3 Verneinung (Negation) und NICHT-Gatter (NICHT-Element)

Der Satz «Wenn meine Schwiegermutter zu Besuch kommt, gehe ich heute Abend nicht ins Theater» bedeutet eine *Verneinung*. Wenn die Aussage A (Schwiegermutter kommt zu Besuch) wahr ist, kann die Aussage X (ins Theater gehen) nicht wahr sein. Ist die Aussage A nicht wahr, wird die Aussage X wahr, und ich gehe ins Theater. Die zugehörige Wahrheitstabelle (Bild 2.7) hat nur 2 Fälle.

Eine elektronische Schaltung, bei der am Ausgang X immer der entgegengesetzte Zustand wie am Eingang A anliegt, heißt NICHT-Gatter, Negationsgatter oder Inverter (Umkehrer).

Fall	A	X
1	0	1
2	1	0

Bild 2.7 Wahrheitstabelle einer Verneinung bzw. eines NICHT-Gatters

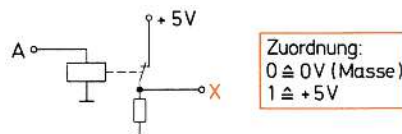


Bild 2.8 NICHT-Gatter

Ein NICHT-Gatter kann durch eine Schaltung nach Bild 2.8 aufgebaut werden. Auch hier muss wieder beachtet werden, dass übliche NICHT-Gatter in Halbleitertechnik aufgebaut werden.



Definition

Jede Schaltung, die die Wahrheitstabelle einer Verneinung erfüllt, ist ein NICHT-Gatter.

Auch die Verneinung kann mit Hilfe der Schaltalgebra ausgedrückt werden.

$$X = \bar{A}$$

Der übergesetzte Strich ist das Zeichen der Verneinung.

Die Schaltzeichen eines NICHT-Gatters zeigt Bild 2.9.



Definition

Am Ausgang eines NICHT-Gatters liegt stets der entgegengesetzte Zustand wie am Eingang.

Bild 2.9
Schaltzeichen des NICHT-Gatters

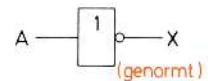


Bild 2.10
Genormte Schaltzeichen der Grundgatter

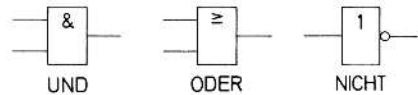
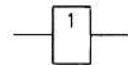


Bild 2.10a
Pegelanhebegatter (Verstärkung ohne Negation), Buffer genannt.



2.1.4 Grundgatter (Grundelemente)

Die Verknüpfungen UND, ODER und NICHT stellen die 3 Grundfunktionen der digitalen Logik dar. Mit genügend viel Gattern UND, ODER und NICHT lassen sich alle nur denkbaren logischen Verknüpfungen aufbauen. Daher werden diese Gatter Grundgatter genannt (Bild 2.10). Zu den Grundgattern gehört auch das Pegelanhebegatter (Bild 2.10a), das allgemein Buffer genannt wird. Liegt an seinem Eingang 1, so liegt auch an seinem Ausgang 1, sonst 0.