

Dietmar Benda



JUBILÄUMSAUSGABE!
Elektronik leicht verständlich.
Über 1.300 Seiten nur
EUR 49,95

Elektronik ohne Ballast

Grundlagen der Elektronik leicht verständlich

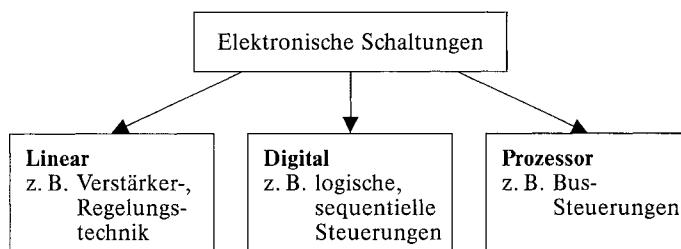
Grundlagen der Elektronik

Bauelemente · Messen und Prüfen · Analoge und digitale Schaltungstechnik · Mikroprozessor/Computer · Leistungselektronik · Nachrichtentechnik · u. v. m.

Vorwort

Im Zeitalter der integrierten Halbleitertechnik verlieren viele Überlegungen an Bedeutung, die in der Elektronenröhren- und Transistortechnik für das Funktionsverständnis von Schaltungen erforderlich waren. Vielfach kam dadurch die irrite Meinung auf, dass für den Einstieg in die Elektronik keine Grundkenntnisse mehr erforderlich wären. Dass dies nicht zutrifft, wird in dem vorliegenden Buch an zahlreichen Beispielen aus der Elektronik gezeigt.

Die Mikroelektronik, insbesondere die Mikroprozessortechnik, hat zu einer neuen Schaltungstechnik geführt, die sich wesentlich von der der einfachen Digitaltechnik unterscheidet und dadurch als eine weitere Schaltungsgruppe betrachtet werden kann. Somit ergibt sich eine Gliederung gemäß der folgenden Abbildung für elektronische Schaltungen.



Das Werk gliedert sich in Elementar-, Aufbau- und Fachstufe.

In der **Elementarstufe** erfährt der Leser, dass ein tieferer Einstieg bereits mit wenigen physikalischen Grundkenntnissen möglich ist. An zahlreichen Beispielen und Vergleichen wird aufgezeigt, dass die Beherrschung dieser Grundregeln das Pauken von „Faustformeln“ und „Eselsbrücken“ überflüssig macht.

Eine theoretische, aber praktisch orientierte Minimalausrüstung ist also der Schlüssel für fundiertes Basiswissen.

Bei den Bauelementen unterscheidet man zwischen mechanischen, elektrischen und elektronischen Bauelementen. Würde man versuchen, alle Varianten zu beschreiben, wäre ein mehrbändiger Katalog das Ergebnis. Die Vielzahl basiert im Wesentlichen auf einigen Grundbauelementen, z. B. Widerständen, Kondensatoren, Dioden und Transistoren. Das Buch zeigt dem Leser die wichtigsten Kennwerte, Leistungs- und Funktionsmerkmale und erklärt anhand praktischer Beispiele die Einsatzmöglichkeiten.

Die zunehmende Standardisierung der Komponenten und Funktionseinheiten in allen Bereichen der Anwendungselektronik sowie die zunehmenden Geschwindigkeiten bei der Datenübertragung und die Verzahnung von Soft- und Hardware verändern die Tätigkeitsschwerpunkte der Elektronikberufe.

Nicht mehr das Wissen um die Dimensionierung von Schaltungskomponenten und deren Anwendung ist gefragt, sondern die Bewertung von Eingangs- und Ausgangsgrößen von Systemkomponenten und Software/Hardware-Schnittstellen.

Die Erfassung und Bewertung dieser Messgrößen erfordert grundlegende und umfangreiche Kenntnisse in der elektronischen Messtechnik und den angewendeten Schaltungs- und Übertragungstechniken.

Daher wird der Leser mit den elementarsten Messkenntnissen und den wichtigsten Messfehler-Möglichkeiten vertraut gemacht. Weiterhin wird er mit allen wesentlichen messtechnisch erfassbaren Funktionsfehlern der Bipolar- und FET-Technologie konfrontiert, statisch und dynamisch, in Linear- und Schaltverstärkern.

Da es für Lernende und Lehrende immer schwieriger wird, aus der vielfältigen Literatur die wesentlichen elektronischen Grundschaltungen herauszufinden und sich als Basiswissen anzueignen, liegt in der **Aufbaustufe** dieses Werkes der Schwerpunkt auf der Darstellung und der Funktionserklärung repräsentativer Schaltungen. Die einzelnen Funktionen sind dazu unter dem Gesichtspunkt der praxis- und berufstypischen Situation beschrieben und ausgewertet. Dabei entsprechen die einzelnen Lernabschnitte dem angestrebten Lernumfang.

Gleichungen und Hinweise zur Dimensionierung dienen in erster Linie dazu, dem Lernenden das Abschätzen und Auswerten der an den Schaltungen gemessenen Potenziale und Kennwerte zu erleichtern. Wo es für das Verständnis erforderlich erschien, wurden die Schaltungen auf vereinfachte Funktionsmodelle zurückgeführt.

Im Wesentlichen werden auch die logischen und sequenziellen Funktionen der Grundelemente der Digitaltechnik erläutert – einschließlich ihrer Anwendung in kombinatorischen Standardschaltungen. Auch die wichtigsten Regeln der Booleschen Algebra und die Anwendung von KV-Diagrammen sind Bestandteil dieser Thematik.

Durch die zunehmende Bedeutung der Prozessortechnik verschieben sich die Einsatzschwerpunkte der Digitaltechnik: So verliert die Anwendung der Digitaltechnik in vollständigen Schaltnetzwerken in zunehmendem Maße an Bedeutung; dafür aber ist ihr Einsatz in Form von Verbindungselementen in Prozessorschaltungen und zur Adaptierung an andere Systeme und periphere Funktionen (Interfaces) weiter vorrangig. Ferner erleichtert die Kenntnis der logischen und sequenziellen

Standardschaltungen der Digitaltechnik das Verständnis der funktionalen Zusammenhänge in der Steuerungs- und Prozessortechnik.

Das Grundwissen über logische Verknüpfungen, Speicherelemente sowie Zeit- und Zählschaltungen ist Voraussetzung für den Einstieg in die Funktionsabläufe und Programmbausteine von speicherprogrammierbaren Steuerungen.

Kennzeichnend für Prozessorschaltungen sind die standardisierten (Bus-)Verbindungen, über die alle Schaltungsfunktionen (periphere Schaltungen) von einer zentralen Funktion (CPU) gesteuert werden, die wiederum ihre Funktionsanweisungen aus einem Speicher(-Programm) erhält.

Der Anwendungselektroniker (Aufbau, Prüfung oder Service) muss daher in erster Linie wie bei der Analog- oder Digitaltechnik die Schaltungen der Prozessortechnik lesen und verstehen können. Für das Verständnis der Systemtechnik ist es aber auch erforderlich, die Steuerungsmöglichkeiten der Befehlsstruktur (Software) zu kennen.

Erläutert werden Aufbau und Funktion der wesentlichsten IS-Bausteine und die zu ihrer Steuerung erforderlichen Programmstrukturen.

Die **Fachstufe** befasst sich mit wichtigen speziellen Ausprägungen der Elektronik. Etwa die fortschreitende Automatisierung durch die Mikroelektronik verlangt auch im elektrischen Energiebereich Schaltungen zur schnelleren und verlustärmeren Umwandlung bzw. Steuerung elektrischer Energie. Dieses Thema soll den Anwender beispielhaft aufzeigen, auf welche Weise er die geeignetsten Schaltungen am zweckmäßigsten in der Energieelektronik einsetzen kann. Daher werden u. a. die gängigsten Bauelemente sowie die Geräte und Anlagen zur Energieversorgung und Antriebstechnik beschrieben. Beschreibungen praktisch angewandter und aktueller Schaltungen aus den wichtigsten Anwendungsbereichen, z. B. aus der Photovoltaik, runden das Thema ab.

Der Begriff „Nachrichtentechnik“ für die Übermittlung von Informationen wurde in den letzten Jahren mehr und mehr durch den Begriff „Kommunikationstechnik“ ersetzt. Dies aus der logischen Konsequenz, dass Entwicklungslinien, die zunächst nebeneinander liefen – Computertechnik auf der einen und Nachrichtentechnik sowie Telekommunikation auf der anderen Seite –, nun zusammenlaufen. Daraus resultieren Schnittstellen, an denen Informationssysteme entstanden sind.

Die unter den Begriff „Kommunikationstechnik“ fallenden Endgeräte und Systeme sind inzwischen so vielfältig geworden, dass in diesem Buch als Auswahl nur Geräte und Systeme mit Zentralfunktionen unter schaltungstechnischen Gesichtspunkten betrachtet werden können. Die Vielzahl der Endgeräte kann nur in Form von Über-

sichten, Begriffserklärungen und einheitlichen Funktionsmerkmalen berücksichtigt werden.

Neben der ausführlichen Darstellung der Grundlagen werden – soweit möglich – Systemfunktionen anhand von praktischen Anwendungsbeispielen erläutert.

Die Satellitenempfangstechnik wird in einem eigenen Abschnitt eingehend in den Funktionen und den Installationsmerkmalen beschrieben.

Auch die Regelungstechnik als Grundvoraussetzung der Automatisierung ist im Wesentlichen durch die Anwendung der Elektronik geprägt. Die zentrale Steuerung, Überwachung und selbsttätige Regelung von Arbeitsvorgängen und von Produktionsprozessen ist dabei die Aufgabe dieser Technik.

Beispiele für solche Regelungsprozesse gibt es aus allen Fabrikations- und Anwendungsbereichen. Sie reichen von einfachen Soll-Ist-Regelungen bis hin zu den komplexesten Automatisierungs- und Robotersteuerungen.

Analoge und digitale Regelung, speicherprogrammierbare Steuerungen als zentrale Regelung sowie die Prozessorregelung werden sowohl unabhängig voneinander als auch im Verbund eingesetzt. Dieser Teil des Buches erklärt für alle Anwendungsbereiche der elektronischen Regelungstechnik die einzelnen Funktionselemente und vermittelt zahlreiche Anwendungsbeispiele.

Der Anwendungsbereich elektronischer Steuerungselemente ist ebenfalls sehr groß. Er reicht vom einfachen analogen Verstärkerglied bis zum prozessorgesteuerten Roboter, von der Lichtschranke bis zur SPS-Fertigungsstraße. Man unterscheidet hier zwischen analoger und digitaler Steuerung, speicherprogrammierbarer Steuerung, Prozessor- und Robotersteuerung (Controller). Diese Techniken können sowohl unabhängig voneinander als auch im Verbund eingesetzt werden. Dementsprechend wurde auch inhaltlich gegliedert. In komplexen Anwendungsbereichen, z. B. Robotersteuerungen, sorgen Übersichtsbeschreibungen und Anwendungsbeispiele für mehr Transparenz.

Inhalt

Teil 1 Elementarstufe

A	Grundlagen der Elektronik	27
1	Die Grundrechenregeln	29
1.1	Die Addition in verschiedenen Ziffernsystemen	29
1.2	Übungen	39
1.3	Die Subtraktion in verschiedenen Ziffernsystemen	41
1.4	Übungen	43
2	UND, ODER, EXKLUSIV-ODER und NICHT	45
2.1	ODER-Verknüpfung	46
2.2	UND-Verknüpfung	50
2.3	EXKLUSIV-ODER-Verknüpfung	51
2.4	Übungen	53
2.5	Das Komplement und die Negation	54
2.6	Übungen	56
2.7	Wie subtrahiert ein Computer?	57
2.8	Übungen	59
3	Das ohmsche Gesetz und seine Anwendung	60
3.1	Zusammenhang zwischen U , I und R	61
3.2	Übungen	63
3.3	Anwendung des ohmschen Gesetzes	65
3.4	Übungen	67
4	Die kirchhoffschen Gesetze	69
4.1	Die Reihenschaltung	69
4.2	Übungen	72
4.3	Der Spannungsteiler	73
4.4	Generator mit Lastwiderstand	74
4.5	Lineare und nichtlineare Widerstände	76
4.6	Übungen	80
4.7	Die Parallelschaltung	80

4.8	Übungen	87
4.9	Belasteter Spannungsteiler	87
4.10	Übungen	90
5	Funktionen von Kondensator und Spule	92
5.1	Funktionsbetrachtung des Kondensators	92
5.2	Übungen	94
5.3	Typen von Kondensatoren	95
5.4	Funktionsbetrachtung der Spule	95
5.5	Übungen	96
5.6	Stromleiter im Magnetfeld	97
5.7	Anwendung von Spulen	102
6	Bauelemente und Schaltungen verbrauchen elektrische Leistung	103
6.1	Prinzipielle Berechnung der Leistung	103
6.2	Belastbarkeit von Bauteilen	104
6.3	Leistung bei Wechselspannung	107
6.4	Übungen	109
6.5	Leistungsanpassung	110
6.6	Übungen	111
7	Zeitglieder und frequenz- abhängige Widerstände	113
7.1	Nochmals zur Wechselspannung	113
7.2	Übungen	115
7.3	Blindwiderstände	115
7.4	Übungen	118
7.5	Spule und Kondensator an Gleichspannung	118
7.6	Übungen	121
8	Dioden und Transistoren	123
8.1	Dioden	123
8.2	Z-Dioden	128
8.3	Transistoren	129
8.4	Übungen	135
9	Lösungen zu den Übungen	137

B Bauelemente	147
1 Ohmsche (lineare) Widerstände	149
1.1 Kennwerte	149
1.2 Kohleschichtwiderstand	155
1.3 Metalloxid-Schichtwiderstand	160
1.4 Metallschichtwiderstand	160
1.5 Drahtwiderstand	161
1.6 Dreh-, Schiebe- und Trimmwiderstand	167
1.7 Widerstandsnetzwerk in Schichttechnik	170
2 Nichtlineare Widerstände	171
2.1 Heißleiter (NTC-Widerstand)	171
2.2 Kaltleiter (PTC-Widerstand oder Thermistor)	172
2.3 Temperaturunabhängiger Widerstand	172
2.4 Spannungs- und stromabhängiger Widerstand	173
3 Kondensatoren	175
3.1 Funktion	175
3.2 Kennwerte	177
3.3 Metallpapierkondensator	179
3.4 Kunststoff-Folienkondensator	181
3.5 Glimmerkondensator	182
3.6 Elektrolytkondensator	182
3.7 Keramikkondensator	184
3.8 Kondensator mit veränderbarer Kapazität	192
4 Spulen	194
4.1 Elektrische Eigenschaften	194
4.2 Induktivität von Einzel- und Doppelleitungen	195
4.3 Luftspule	195
4.4 Spule mit Massekern	198
4.5 Spule mit Eisenblechkernen	200
4.6 Spule mit Ferritkern	203
5 Diskrete Halbleiterbauelemente	204
5.1 Was sind Halbleiter?	204
5.2 Stromfluss im Halbleiter	208
5.3 Dioden	209
5.3.1 Allzweckdiode	212

5.3.2	Kapazitätsdiode	213
5.3.3	Silizium-Schalterdiode	216
5.3.4	Si-PIN-Dioden-Regler	217
5.3.5	Z-Diode	217
5.3.6	Tunneldiode	218
5.3.7	Backward-Diode	219
5.3.8	Silizium-Kontaktschutzdiode	219
5.3.9	Schottky-Diode	220
5.4	Gleichrichter	220
5.4.1	Einweggleichrichter	220
5.4.2	Brückengleichrichter	221
5.5	Vierschichthalbleiter	222
5.5.1	Vierschichtdiode	222
5.5.2	Diac (Triggerdiode)	223
5.4.3	Thyristoren	224
5.5.4	Thyristortetrode	227
5.5.5	Triac	227
5.6	Transistoren	228
5.6.1	Bipolartransistor	229
5.6.2	Unipolartransistor	235
5.6.3	Lawinentransistor	238
5.6.4	Unijunction-Transistor	239
5.7	Mikrowellengeneratoren	239
5.8	Thermogenerator und Thermokühler	242
5.9	Hallgenerator	244
6	Integrierte Halbleiterschaltungen	245
6.1	Digitale TTL-IS	245
6.1.1	Funktionseigenschaften	247
6.1.2	Eingangssignale	248
6.1.3	Ausgangssignale	249
6.1.4	TTL-Lasteinheit, Fan-out	250
6.1.5	Störspannungsabstände	251
6.1.6	Eingangs-Clamping-Dioden	253
6.1.7	WIRED-OR	253
6.1.8	Gatter	255
6.1.9	Flipflops	257
6.1.10	Stromspitzen	258
6.1.11	Temperaturbereiche	258
6.2	Digitale CMOS-IS	258

6.2.1	Kennwerte	259
6.2.2	Offene Eingänge	260
6.2.3	Fan-out	260
6.2.4	Eingangssignale	261
6.2.5	Parallelenschaltung	261
6.2.6	Interface für TTL-Schaltungen	261
6.2.7	Eigenschaften	261
6.2.8	Grenzwerte	261
6.2.9	Betriebsspannung	262
6.2.10	Behandlung von CMOS-Schaltungen	262
6.3	Analoge (lineare) IS	263
6.3.1	Operationsverstärker	263
6.3.2	IS für Rundfunk- und Fernsehempfänger	266
7	Bus-Funktionen	269
7.1	IS mit Tri-state-Ausgang	269
7.2	Halbleiterspeicher	271
7.2.1	Schreib-Lese-Speicher	272
7.2.2	Festspeicher	272
7.2.3	Programmierbarer Festspeicher	273
7.2.4	Löschbares PROM	273
7.3	Ein-Ausgabe-Bausteine	273
8	Sensoren	276
8.1	Temperatursensoren	276
8.2	Lichtsensoren	277
8.3	Druck- und Kraftmess-Sensoren	281
8.4	Sensoren zur Erfassung mechanischer Größen	284
9	Optoelektronische Bauelemente	287
9.1	Fotowiderstand	287
9.2	Fotodiode	288
9.3	Fototransistor	289
9.4	Leuchtdioden	290
9.5	Optokoppler	294
10	SMD-Technik	297
10.1	SMD-Widerstände	297
10.2	SMD-Kondensatoren	299
10.3	SMD-Dioden und -Transistoren	299
10.4	Integrierte SMD-Schaltungen	301

11 Normen und Symbole	304
11.1 Kennzeichen für Veränderbarkeit	304
11.2 Widerstände	304
11.3 Spulen	306
11.4 Kondensatoren	306
11.5 Halbleiterwiderstände	307
11.6 Halbleiterdioden und Vierschichtelemente	307
11.7 Bipolare Transistoren	308
11.8 Unipolare Transistoren	309
C Messen an Bauelementen und Schaltungen	311
1 Was man beim Messen alles beachten muss	312
1.1 Messen der elektrischen Größen	314
1.2 Sicherung des Messgeräts	320
2 Basiswissen der Messtechnik mit dem Digitalmultimeter (DMM)	322
2.1 Polarität bei Spannungsmessungen	323
2.2 Übungen	327
2.3 Polarität bei Strommessungen	327
2.4 Messen von Gleich- oder Wechselgrößen	329
2.5 Welcher Messbereich soll gewählt werden?	330
2.6 Weitere Messfunktionen bei DMM	335
2.7 Innenwiderstandsverhältnis von Messobjekt und Messgerät ..	341
2.8 Messleitungen, Einfluss von Länge und Qualität	342
2.9 Messgenauigkeit der Messinstrumente	345
2.10 Fehler im Messaufbau oder im Messobjekt	346
3 Messpraktikum mit DMM	348
3.1 Durch Widerstandsmessungen im Stromkreis Festzustellendes	348
3.2 Übungen	352
3.3 Schneller Komponententest	352
3.4 Übungen	356
3.5 Funktionsprüfungen an Halbleiterbauelementen durch Spannungsmessungen	357
4 Messungen mit dem Oszilloskop	362
4.1 Funktionsübersicht und Bedienelemente	362
4.2 Erzeugung der Zeitablenkung	364

4.3	Triggerflanke und Triggerpegel	365
4.4	Stabilität	366
4.5	Triggersignale	366
4.6	Ankopplung	367
4.7	Helltautung	368
4.8	Dehnung	368
4.9	Übungen	369
5	Messungen mithilfe des PC	373
5.1	Wie funktioniert ein PC-Oszilloskop?	374
5.2	DMM mit Computerschnittstelle	375
6	Lösungen zu den Übungen	379

Teil 2 Aufbaustufe

A	Analoge (lineare) Schaltungstechnik	381
1	Definitionen und Grundbegriffe der Analogtechnik	382
1.1	Merkmale analoger Signalverarbeitung	382
1.2	Übertragungselemente der Analogtechnik	383
1.3	Funktionsdefinitionen	383
2	Grundschaltungen	385
2.1	Spannungsteiler	385
2.2	Brückenschaltungen	387
2.2.1	Messbrücken für ohmsche Widerstände	390
2.2.2	Kapazitäts- und Induktivitätsmessbrücken	392
2.2.3	Temperatur- und HF-Strom-Messbrücken	393
2.2.4	Dehnungs- und Druckmessbrücken	394
2.3	Phasenverschiebungsschaltungen	395
2.3.1	Phasenverschiebungsglieder	395
2.3.2	Phasenbrücken	398
2.4	Frequenzabhängige Übertragungsglieder und Filter	399
2.5	Übungen	402
3	Spannungs- und Stromversorgungsschaltungen	405
3.1	Gleichrichterschaltungen	406
3.1.1	Einwegschaltung	407

3.1.2	Zweiwegschaltung	408
3.1.3	Zweiweg-Brückenschaltung	409
3.1.4	Gesteuerter Gleichrichter	410
3.2	Ladekondensator und Siebglieder	412
3.2.1	Ladekondensator	412
3.2.2	Siebglieder	413
3.3	Spannungsvervielfachung	415
3.4	Begrenzer- und Stabilisierungsschaltungen	417
3.4.1	Diodenschaltungen	418
3.4.2	Z-Diodenschaltung	419
3.5	Elektronische Regler	423
3.5.1	Funktionsmerkmale	424
3.5.2	Spannungsstabilisierung	426
3.6	Übungen	433
4	Verstärkerschaltungen	436
4.1	Grundlagen der Verstärkertechnik	436
4.1.1	Das Dezibel als Maßeinheit der Verstärkung	437
4.1.2	Übertragungseigenschaften	439
4.1.3	Verzerrungen, Klirrfaktor und Störsignale	443
4.1.4	Nullpunkttdrift und Ausgangswerte	445
4.2	Verstärkergrundschaltungen	446
4.2.1	Strom-, Spannungs- und Leistungsverstärkerstufe	447
4.2.2	Erzeugung des Arbeitspunkts	454
4.3	Verstärkerkopplungen	455
4.3.1	Widerstandskopplung	456
4.3.2	Direkte oder galvanische Kopplung	456
4.3.3	Kapazitive Kopplung	457
4.3.4	Übertrager- und Bandfilterkopplung	457
4.4	Verstärkergegenkopplungen	460
4.4.1	Thermische Beanspruchung	465
4.4.2	Gegenkopplung über mehrere Stufen	467
4.5	Mehrstufige Verstärkergrundschaltungen	468
4.5.1	Differenzverstärker	469
4.5.2	Gegentaktverstärker	472
4.5.3	Kaskadenverstärker	474
4.5.4	Kettenverstärker	475
4.6	Übungen	476

5 Schwingschaltungen	480
5.1 Mitkopplung	480
5.2 LC-Oszillator	481
5.3 RC-Oszillator	482
5.4 Quarzoszillatoren	485
5.5 Spannungsgesteuerter Oszillator (VCO)	486
5.6 Übungen	489
6 Modulator- und Demodulatorschaltungen	491
6.1 Amplitudenmodulation (AM)	492
6.2 Demodulatorschaltungen für AM	497
6.3 Frequenzmodulation (FM)	499
6.4 Demodulatorschaltungen für FM	501
6.5 Übungen	504
7 Integrierte Verstärker	506
7.1 Kennwerte des Operationsverstärkers	506
7.2 Grundschaltungen	511
7.3 Übungen	511
8 Aktive Filter	517
8.1 Filter erster Ordnung	517
8.2 Filter höherer Ordnung	518
9 Analog-Digital-Wandler	521
9.1 Verfahren	521
9.2 Parallelverfahren	522
9.3 Wägeverfahren	523
9.4 Einsatz integrierter AD-Wandler	524
10 Lösungen zu den Übungen	530
B Digitale Schaltungstechnik	535
1 Digitale Signale als Träger der Informationen	536
1.1 Das digital-binäre System	536
1.2 Vergleich von digitaler und analoger Signalverarbeitung	537
1.2.1 Leistung und Wirkungsgrad	537
1.2.2 Betriebssicherheit und Stabilität	538
1.2.3 Genauigkeit	539

2	Funktionen der Bauelemente in digitalen Schaltungen	540
2.1	Elektrische Funktion eines Schalters	541
2.2	Diode als Schalter	541
2.3	Transistor als Schalter	543
2.4	Definition der Schaltzeiten	546
2.5	Emitterschaltung im Schalterbetrieb	548
2.6	Kollektorschaltung im Schalterbetrieb	549
2.7	Transistorschalter bei induktiver und kapazitiver Last	550
2.8	Übertragung, Klammerung und Begrenzung digitaler Signale	554
2.8.1	Kapazitive Kopplung	554
2.8.2	Kompensierter Spannungsteiler	555
2.8.3	Klammer- und Begrenzerschaltungen	556
2.9	Übungen	558
2.10	Kennwerte von TTL-ICs	560
2.11	Kennwerte von CMOS-ICs	563
3	Logische Grundschaltungen	565
3.1	Negation (NICHT-Verknüpfung)	566
3.2	Konjunktion (UND-Verknüpfung)	568
3.3	Disjunktion (ODER-Verknüpfung)	569
3.4	NAND-Verknüpfung	571
3.5	NOR-Verknüpfung	573
3.6	ANTIVALENZ-Verknüpfung	574
3.7	ÄQUIVALENZ-Verknüpfung	575
3.8	Übungen	576
4	Logische Schaltnetze	579
4.1	Prioritätsencoder	579
4.2	Multiplexer (Datenselektor)	580
4.3	Demultiplexer (Decoder)	582
4.4	Vergleicher	583
4.5	Komplementierer	586
4.6	Volladdierer	587
4.7	Arithmetisch-logische Einheit (ALU)	593
5	Kippstufen, Speicherschaltungen	597
5.1	Gliederung und Funktion	597
5.2	Integrierte Kippschaltungen und Taktgeneratoren	599
5.2.1	RS- oder Basis-Flipflop	599
5.2.2	Positiv-flankengetriggertes Flipflop	600
5.2.3	Negativ-flankengesteuertes Flipflop	602

5.2.4	Pulsgetriggertes Flipflop (Master-Slave)	603
5.2.5	Monoflop	604
5.2.6	Schmitt-Trigger	605
5.3	Übungen	606
6	Schaltwerke	608
6.1	Betriebsarten	608
6.1.1	Synchrone Steuerung	608
6.1.2	Asynchrone Steuerung	608
6.2	Taktgenerator	609
6.3	Zähler und Frequenzteiler	609
6.4	Ringzähler	614
6.5	Schieberegister	616
6.6	Rechenelemente	619
6.7	Übungen	623
7	Codes und Code-Umsetzer	624
7.1	Code-Umsetzer	625
7.1.1	BCD-zu-Dezimal-Decodierer	626
7.1.2	Excess-3-zu-Dezimal-Decodierer	626
7.1.3	BCD-zu-Siebensegment-Decodierer	628
7.2	Paritätsgenerator, Paritätsprüfer	630
8	Digital-Analog-Umsetzer (DAU)	632
8.1	Stromsummierer	632
8.2	Widerstandskettenleiter	636
8.3	DAU mit elektronischen Schaltelementen	637
8.4	Einchip-DAU	640
8.5	Übungen	644
9	Digitale Filter	646
9.1	A-D- und D-A-Umsetzung	646
9.2	Grundaufbau	647
9.3	IC-Beispiel	648
10	KV-Diagramme zur Erstellung von Schaltnetzen	652
10.1	Das KV-Diagramm	652
10.2	Beispiel mit drei Variablen	653
10.3	Bausteinauswahl	655
10.4	Beispiel mit fünf Variablen	656
11	Lösungen zu den Übungen	659

C	Mikroprozessor- und Computer-Schaltungstechnik	665
1	Was sind Bus-Leitungen und Bus-Systeme?	667
1.1	Mögliche schaltungstechnische Lösungen	669
1.2	Beispiel für eine Programminstruktion	671
1.3	Blockschaltbild eines Speicherbausteins	673
2	Aufbau des Computers und der MPU	675
2.1	Einige Prozessoren	675
2.2	16-bit-MPU	676
2.3	Eingehendere Erläuterung einiger Anschlussfunktionen	681
3	Was sind Befehle und Adressierungen?	685
3.1	Code-Informationen	685
3.2	Befehlsaufbau	685
4	Wie werden Befehle und Unterbrechungen zeitlich gesteuert?	691
4.1	Arbeitsgeschwindigkeit	691
4.2	Operationszyklen	691
5	Mikroprozessorgesteuerte Halbleiterspeicher	699
5.1	Speicherkenngrößen	699
5.2	Schreib-Lese-Speicher	700
5.2.1	Statische Speicher	700
5.2.2	Dynamische Speicher	703
5.3	Festwertspeicher	704
5.4	Wie werden Speicherbausteine an die MPU angeschlossen?	707
6	Arbeiten mit Ein-/Ausgabe-Bausteinen	716
6.1	Einfache Ein-/Ausgabe-Funktion	719
6.2	Programmierbare Ein-/Ausgabe-Funktion	721
6.3	Einchip-Speicher und Ein-/Ausgabe-Funktion	724
6.4	Programmierbarer Serienschnittstellen-Baustein	731
6.5	Programmierbarer Tastatur- und Anzeigebaustein	736
6.6	Programmierbarer Zeitgeberbaustein	741
7	Bildschirmsteuerung	746
7.1	Monochrome Bildschirmsteuerung	746
7.2	Farb-Bildschirmsteuerung	751
7.3	Grafik-Bildschirmsteuerung	757

8	Erstellen und Prüfen von Programmen	760
8.1	Programmbeispiele	763
8.1.1	Addition	763
8.1.2	Speicherplätze löschen	765
8.2	Assemblierung mit Computer-Entwicklungssystem	767
8.2.1	Befehls-Syntax des Primärprogramms	767
8.2.2	Pseudo-Befehle	768
8.3	Debugger	770

Teil 3: Fachstufe

A	Energie- bzw. Leistungs-elektronik	773
1	Einsatzbereiche und Gliederung	775
1.1	Stromrichter-Betriebsarten	775
1.2	Stromrichter-Funktionsgruppen	776
2	Halbleiterventile	779
2.1	Dioden	779
2.2	Thyristoren	781
2.3	Triac	784
2.4	Selengleichrichter	787
2.5	Reihen- und Parallelschaltungen von Ventilen	789
3	Stromrichterschaltungen	791
3.1	Gleichrichterschaltungen	791
3.1.1	Brückenschaltungen	792
3.1.2	Spannungs- und Stromglättung	795
3.2	Wechselrichter	798
3.2.1	Selbstgelöschte Wechselrichter	799
3.2.2	Lastgelöschte Wechselrichter	800
3.3	Umrichter	802
3.4	Gleichspannungssteller	803
3.5	Wechsel- und Drehstromsteller	805
3.6	Steuerschaltungen und Taktgeneratoren	807
4	Schutz- und Hilfseinrichtungen	812
4.1	Überspannung- und Überstrom-Schutzschaltungen	812
4.2	Schutz vor Netzrückwirkungen	815
4.3	Funk-Entstörung	818

5	Stromversorgungsschaltungen	820
5.1	Lade- und Puffergeräte	820
5.2	Notstromgeräte für Wechselstrom	824
5.3	Elektronisch geregelte Gleichstrom-Versorgungsschaltungen	825
6	Anwendungsbeispiele mit integrierten Steuer- und Regelfunktionen	829
6.1	Sensorbedienbarer Treppenlicht-Zeitschalter	829
6.2	Nullspannungsschalter	833
6.3	Phasenanschnittsteuerung	835
6.4	Weitere Anwendungsbeispiele für integrierte Steuer- und Regelbausteine	840
7	Antriebssteuerungen und Antriebsregelungen	843
7.1	Drehzahlregelung mit Impulssteuerung	843
7.2	Drehzahlregelung mit Sägezahnsteuerung	844
7.3	Motorsteuerungen mit SPS	846
7.4	Wechselrichterbetrieb für Gleichstromantriebe	851
7.5	Getaktete Endstufen	856
8	Drehstrom-Servoantriebe mit modularen Regelverstärkersystemen	859
8.1	Versorgungsmodul	860
8.2	Verstärkermodul	863
8.3	Drehstrom-Servomotor	865
8.4	Netzanschluss für AC-Antriebe	866
9	Anwendungsbeispiele für Wechselrichter in der Photovoltaik	868
9.1	Schaltungsübersicht und Teilschaltungen	868
9.2	Dreiphasige Einspeisung	868
9.3	„Multi-String“-Netzkopplung	871
Teil B Nachrichtentechnik		873
1	Übersicht	875
1.1	Fernseh- und Rundfunktechnik	877
1.2	Fernsprechsysteme	877
1.3	Bildschirmtext (Btx)	877
1.4	Datentechnik, sprachgesteuert	879
1.5	Funktechnik	880
1.6	Verkehrs- und mobile Informationstechnik	881
1.7	Übertragungstechnik	881

2	Grundlagen der Nachrichten- und Übertragungstechnik	882
2.1	Schwingungen und ihre Übertragungseigenschaften	883
2.1.1	Lange Wellen	888
2.1.2	Mittlere Wellen	888
2.1.3	Kurze Wellen	888
2.1.4	Ultrakurze Wellen	890
2.2	Kabel und Glasfaserleitungen	891
2.2.1	Doppeladerkabel	892
2.2.2	Koaxialkabel	894
2.2.3	Lichtwellenleiter (LWL)	895
2.3	Send- und Empfangsantennen	898
2.3.1	Sendantennen	898
2.3.2	Richtfunkantennen als Relaisstationen	903
2.3.3	Empfangsantennen	903
2.4	Verstärkung, Dämpfung, Anpassung	906
2.5	Modulation und Demodulation	908
2.6	Sender	913
3	Fernsprech-Vermittlungstechnik	914
3.1	Koppelnetze	915
3.2	Teilnehmeranschlussystem im Fernsprechnetz	918
3.3	Netzstrukturen	923
3.4	Digitales Ortsnetz	925
3.5	Fernvermittlungstechnik	926
3.6	Internationale Fernvermittlungstechnik	927
3.7	Signalisierung im Fernverkehr	931
3.8	Gebührenerfassung	935
3.9	Dämpfungsplan	936
4	Digitales Vermittlungssystem (ISDN)	938
4.1	Systemstruktur	938
4.2	Verteilte Steuerung	942
4.3	Digital-Koppelnetz	944
4.4	Anschlussmodule	946
4.5	Softwarestruktur	948
4.6	Systemverfügbarkeit	950
4.7	Analog-Teilnehmersatz	950
4.8	Analog-Verbindungssatz	955
4.9	Digitaler Verbindungssatz	959
4.10	Koppelnetz-Baustein	961

5	Richtfunksysteme	969
5.1	Analoges Richtfunksystem	969
5.2	Digitales Richtfunksystem	970
6	Satellitensysteme	977
6.1	Funktionsübersicht	977
6.2	Digitales Vermittlungssystem	979
6.3	Technik des Satellitenempfangs	980
C	Regelungstechnik	993
1	Regelungstechnische Grundlagen	995
1.1	Regelungstechnische Grundbegriffe	996
1.2	Regelkreis im Blockschema	1000
1.3	Regelverstärker	1001
2	Regeln und Steuern	1009
2.1	Beispiele	1009
2.2	Funktionsschema	1012
3	Zeitverhalten von Regelkreisen	1015
3.1	Proportionalglied	1016
3.2	Totzeitglied	1019
3.3	Integrierglied	1020
3.4	Differenzierglied	1021
3.5	Summierungsstelle	1021
3.6	Kennlinienglied	1022
3.7	Multiplikatives Glied	1023
3.8	PI-Regler	1023
3.9	PID-Regler	1025
3.10	Regelung nichtlinearer Strecken	1028
4	Nachlaufsynchronisation	1032
4.1	Abtast-Halteglied	1033
4.2	Synchrongleichrichter	1034
4.3	Frequenzempfindlicher Phasendetektor	1036
4.4	Phasendetektor mit erweitertem Messbereich	1038
4.5	Frequenzvervielfacher mit PLL	1039

5	Sensoren	1041
5.1	Schutzarten und Einsatzbeanspruchung	1042
5.2	Induktiver Wegsensor	1043
5.3	Drehzahlsensor	1045
5.4	Kraftsensor	1047
5.5	Absolutdrucksensor	1049
5.6	Gabelkoppler	1051
5.7	Reflexkoppler	1052
5.8	Inkrementale Drehgeber	1056
6	Robotersteuerung und -regelung	1059
6.1	Mechanische Grundlagen	1059
6.2	Steuerung und Bedienung	1060
7	Anwendungsbeispiele und Anwendungsschaltungen	1063
7.1	Spannungsregler	1063
7.2	Nachlaufregelung mit P-, I- und D-Regler	1073
7.3	Drehzahlregelung mit Blockierschutz	1078
7.4	Nachlaufsteuerung für mechanische Stelleinrichtungen	1080
7.5	Zweipunkt-Temperaturregelung	1082
7.6	Regelschaltung für die Vertonung	1083
7.7	Digitalservo	1086
7.8	SPS- und Mikrocomputer-Regelungen	1088
7.9	Regelverstärker für Drehstrom-Servoantriebe	1092
7.10	Fuzzy-Control	1094
D	Steuerungstechnik	1097
1	Grundlagen und Systemübersicht	1099
1.1	Grundlagen	1099
1.2	Systemübersicht	1101
1.3	Gesteuerte Verbraucher und Geräte	1103
1.4	Steuereinrichtungen	1106
2	Analoge Steuerungen	1111
2.1	Stabilisierungsschaltungen für Strom und Spannung	1111
2.2	Verstärkerschaltung	1119
2.3	Steuerschaltung für Gleichstrommotor	1120
2.4	Nachlaufsteuerung	1122

2.5	Frequenz- und Drehzahlmessung	1124
2.6	Impulsbreiten-Steuerung für Gleichstromlast	1128
3	Digitale Steuerungen	1131
3.1	Normierschaltung	1131
3.2	Sicherheitsschaltung	1132
3.3	Führungssteuerung	1132
3.4	Drehrichtungssteuerung	1133
3.5	Digitale Drehzahlsteuerung für einen Gleichstrommotor	1134
3.6	Steuerschaltung für einen Schlittenantrieb	1136
3.7	Drehzahlmesser	1137
3.8	Umdrehungswächter	1138
3.9	Erstlingsmelder	1140
3.10	Prüfschaltung für Schaltnetze	1142
3.11	Druckgussautomat	1145
3.12	Hydraulische Presse	1147
3.13	Digitaler Phasenschieber	1151
4	Speicherprogrammierbare Steuerungen	1157
4.1	Wie arbeiten speicherprogrammierbare Steuerungen?	1158
4.2	Programmsteuerung der SPS	1158
4.3	Programmieren von logischen Verknüpfungen	1162
4.4	Programmieren von Speicherfunktionen	1163
4.5	Zeit- und Zähloperationen	1165
4.6	Sprunganweisungen	1167
4.7	Lade-Sofort-Anweisung	1169
4.8	Flankenerkennung	1170
4.9	Anwendungsbeispiele	1172
5	Mikrocomputer-Steuerungen	1178
5.1	Steuerung einer Modell-Verkehrsanlage	1178
5.2	Schrittmotorsteuerung	1182
5.3	Schnittstelle für Steuerungsmodelle	1189
6	Roboter-Controller	1195
6.1	Steuerungssysteme	1195
6.2	Sensor-Datenverarbeitung	1196
6.3	Anwendungsbereiche von RC-Systemen	1198
	Sachverzeichnis	1203

1 Die Grundrechenregeln

Die Rechenregeln helfen nicht nur bei der Anwendung von physikalischen Gesetzen, sondern auch bei der Umwandlung von Ziffernsystem zu Ziffernsystem.

Es gibt zwei Möglichkeiten, eine Tätigkeit auszuüben:

- eine bekannte Tätigkeit, die systematisch und gewohnheitsmäßig durchgeführt wird,
- eine unbekannte Tätigkeit, die volle geistige Konzentration und Beachtung von Verhaltensregeln erfordert.

Können Sie sich noch an Ihre erste Autofahrt erinnern? Die Fahrt war bestimmt anstrengender und ermüdender als eine Autofahrt unter gleichen Bedingungen nach mehrjähriger Praxis.

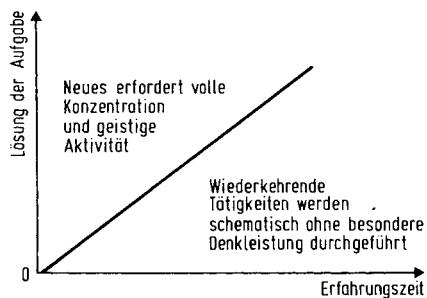


Abb. 1.1: Neue Tätigkeiten und Routinearbeiten

Die erste Ausfahrt verlangte volle Konzentration und Beachtung der Verkehrsregeln, da alles neu war. Je länger die Fahrpraxis, umso routinierter die Reaktionen und die Beachtung der Regeln. Man kann dies wie in Abb. 1.1 gezeigt veranschaulichen.

1.1 Die Addition in verschiedenen Ziffernsystemen

Prüfen Sie sich einmal kritisch, wenn Sie addieren und subtrahieren. Wissen Sie genau, was Sie tun, oder arbeiten Sie nach einem Schema? Versuchen Sie folgende Aufgabe zu lösen:

$$\begin{array}{r}
 24 \\
 + 17 \\
 \hline
 \dots
 \end{array}$$

Diese Aufgabe war bestimmt kein Problem? Sie haben die Aufgabe gelöst, weil Sie der Meinung sind, dass Sie die Rechenregeln und das Ziffernsystem beherrschen. Wenn dies wirklich der Fall ist, könnten Sie die Zahlen auch in das oktale Ziffernsystem umsetzen und unter Anwendung der Rechenregeln in diesem Ziffernsystem addieren.

Dezimal	Achter (Oktal)
24
<u>+ 17</u>	<u>+</u>
.....

Konnten Sie diese Aufgabe lösen, so haben Sie den Beweis erbracht, dass Sie die Rechenregeln in beiden Ziffernsystemen beherrschen. Sie brauchen deshalb die folgenden Ausführungen nicht mehr durchzuarbeiten und können gleich das nächste Kapitel beginnen.

Wenn Sie aber die Aufgabe nicht lösen konnten, so beherrschen Sie die Rechenregeln nicht ausreichend. Betrachten wir daher in den folgenden Beispielen den Aufbau der Ziffernsysteme etwas genauer.

Mit dem Dezimal- bzw. Zehner-Ziffernsystem sind wir bestens vertraut. Deshalb wollen wir uns zuerst diesem zuwenden. Dieses Ziffernsystem hat einen Ziffernvorrat von zehn Ziffern. Dies sind die Ziffern:

0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9

Aus diesem Ziffernvorrat kann man beliebige Zahlenwerte bilden.

Solange eine dieser Ziffern für sich allein steht, hat sie die „Einer-Wertigkeit“. Diese Wertigkeit kann man auch in der Potenzschreibweise darstellen:

$$1 \cdot 10^0, 2 \cdot 10^0, 3 \cdot 10^0 \text{ usw. bis } 9 \cdot 10^0$$

Die Zahl Zehn wird hier als Basis bezeichnet. Sie gibt den Ziffernvorrat und damit die Wertigkeit dieses Ziffernsystems an.

Basis
 ↓
 Exponent

Ziffer als
Multiplikator
 $\rightarrow 2 \cdot \underbrace{10^0}_{\text{Potenz}}$
← Exponent

Die rechte Ziffer über der Basis ist der Exponent. Der Exponent gibt an, wie viel mal die Basis mit sich selbst malgenommen werden muss. Die Ziffer davor gibt die Wertigkeit im Ziffernvorrat an, mit dem die Potenz multipliziert werden muss.

Dazu einige Beispiele:

$$1 \cdot 10^0 = 1$$

$$2 \cdot 10^0 = 2$$

$$3 \cdot 10^0 = 3$$

$$9 \cdot 10^0 = 9$$

Wird der Wert des Exponenten erhöht, nehmen die Zahlen folgende Werte an:

$$1 \cdot 10^1 = 1 \cdot 10 = 10$$

$$1 \cdot 10^2 = 10 \cdot 10 = 100$$

$$1 \cdot 10^3 = 10 \cdot 10 \cdot 10 = 1000$$

An den Beispielen sehen wir, dass der Exponent angibt, wie oft die Basis mit sich selbst multipliziert werden muss.

Die Potenz, multipliziert mit der Ziffer, ergibt dann die entsprechende Zahl, z. B.:

$$3 \cdot 10^1 = 3 \cdot 10 = 30$$

$$5 \cdot 10^2 = 5 \cdot 10 \cdot 10 = 500$$

$$9 \cdot 10^0 = 9 \cdot 1 = 9$$

Die Beispiele zeigen auch, dass die Potenz den Stellenwert angibt und der Multiplikator die Ziffer davor:

$$\begin{array}{r} 0 \cdot 10^4 & 1 \cdot 10^3 & 9 \cdot 10^2 & 9 \cdot 10^1 & 1 \cdot 10^0 \\ & 0 & 1 & 9 & 9 & 1 \end{array}$$

Das Beispiel zeigt, dass die Potenz $1 \cdot 10^0 = 1$ im dezimalen Ziffernsystem den Stellenwert der „Einer“ angibt, die $9 \cdot 10^1$ den Stellenwert der „Zehner“, die $9 \cdot 10^2$ den Stellenwert der „Hunderter“, die $1 \cdot 10^3$ den Stellenwert der „Tausender“ und die $0 \cdot 10^4$ den Stellenwert der „Zehntausender“. Wir erkennen daran auch, dass von Stelle zu Stelle ein Zehnersprung vorliegt.

Kehren wir zurück zu dem ersten Additionsbeispiel:

$$\begin{array}{r} 10^1 & 10^0 \\ 2 & 4 \\ + 1 & 7 \\ \hline \text{Übertrag} & 1 \\ \hline \text{Summe} & 4 & 1 \end{array}$$

Im „Einer“-Stellenwert wird durch die Addition der Ziffern 4 und 7 der Ziffernvorrat überschritten. Hierbei wird der Rest des „Einer“-Wertes als „Einer“-Summe angeschrieben, in diesem Beispiel die 1. Die Summe „Zehn“ wird als Übertrag der „Zehner“-Stelle zugeordnet und in der Summenbildung dieses Stellenwerts als Ziffer 1 berücksichtigt.

Die Logik dieser Rechenregeln können wir auf alle Ziffernsysteme übertragen. Wir können selbst Ziffernsysteme eröffnen und mit diesen genauso rechnen wie im Zehner- bzw. Dezimalsystem.

Versuchen wir nun, mit den gleichen Überlegungen die Lösung für alle Ziffernsysteme zu finden.

Wir wissen, dass jedes Ziffernsystem einen bestimmten Ziffernvorrat besitzt. Alle Ziffernsysteme, die einen kleineren Ziffernvorrat als das Zehnersystem haben, können mit den Ziffern des „Zehner“-Systems berechnet werden. *Tabelle 1.1* zeigt die Ziffernvorräte und die Stellenwertigkeiten der Ziffernsysteme 2 bis 10.

Tabelle 1.1: Ziffernsysteme mit Ziffernvorrat 0 bis 9

Ziffern- system	Ziffernvorrat	Stellenwertigkeit				
Zweier (Dual)	0-1	2^4 16	2^3 8	2^2 4	2^1 2	2^0 1
Dreier	0-1-2	3^4 81	3^3 27	3^2 9	3^1 3	3^0 1
Vierer (Quarta)	0-1-2-3	4^4 256	4^3 64	4^2 16	4^1 4	4^0 1
Fünfer	0-1-2-3-4	5^4 625	5^3 125	5^2 25	5^1 5	5^0 1
Sechser	0-1-2-3-4-5	6^4 1296	6^3 216	6^2 36	6^1 6	6^0 1
Siebener	0-1-2-3-4-5-6	7^4 2401	7^3 343	7^2 49	7^1 7	7^0 1
Achter (Oktal)	0-1-2-3-4-5-6-7	8^4 4096	8^3 512	8^2 64	8^1 8	8^0 1
Neuner	0-1-2-3-4-5-6-7-8	9^4 6561	9^3 729	9^2 81	9^1 9	9^0 1
Zehner (Dezimal)	0-1-2-3-4-5-6-7-8-9	10^4 10000	10^3 1000	10^2 100	10^1 10	10^0 1

Aus *Tabelle 1.1* ist ersichtlich, dass der Ziffernvorrat entsprechend der Wertigkeit des Ziffernsystems ansteigt. Aus der Spalte „Stellenwertigkeit“ ist zu erkennen, dass die Basiszahl die Wertigkeit des Ziffernsystems darstellt. Daraus ergeben sich die einzelnen Stellenwerte. Im „Zweier“-System verdoppelt sich der Stellenwert mit steigendem Wert des Exponenten. Im Dreiersystem erfolgt eine Verdreifachung, im Vierersystem eine Vervierfachung usf.

Man kann auch Ziffernsysteme benutzen, die über dem des Zehner-Ziffernsystems liegen. Nur muss man dafür neue Ziffern bilden. In der Praxis nimmt man hierfür das Alphabet, wie es in *Tabelle 1.2* dargestellt ist.

Tabelle 1.2: Ziffernsysteme mit Ziffernvorrat 11 bis 16

Ziffern- system	Ziffernvorrat	Stellenwertigkeit			
Elfer	0-1-2-3-4-5-6-7-8-9-A	11^3 1331	11^2 121	11^1 11	11^0 1
Zwölfer	0-1-2-3-4-5-6-7-8-9-A-B	12^3 1728	12^2 144	12^1 12	12^0 1
Dreizehner	... A-B-C	13^3 2197	13^2 169	13^1 13	13^0 1
Vierzehner	... A-B-C-D	14^3 2744	14^2 196	14^1 14	14^0 1
Fünfzehner	... A-B-C-D-E	15^3 3375	15^2 225	15^1 15	15^0 1
Sechzehner (hexadezimal)	... A-B-C-D-E-F	16^3 4096	16^2 256	16^1 16	16^0 1

Der Ziffernvorrat der *Tabelle 1.2* zeigt, dass an die Stelle der zweistelligen Zahl 10 (im Dezimalsystem) der Buchstabe A getreten ist, 11 steht für den Buchstaben B, 12 für den Buchstaben C, 13 für den Buchstaben D, 14 für den Buchstaben E und 15 für den Buchstaben F. Somit wurde es möglich, in den Ziffernsystemen, die den Ziffernvorrat des Dezimalsystems überschreiten, mit einstelligen Ziffernwerten auszukommen.

Versuchen wir jetzt, einen Teil unserer eingangs gestellten Aufgabe (24 + 17) im oktalen Ziffernsystem zu lösen.

Bevor wir die Additionen der Zahlen im Oktalsystem vornehmen können, müssen wir erst die Zahlen aus dem Zehner-Ziffernsystem in das Oktal-Ziffernsystem umsetzen.

Die Zahlen 24 und 17 (dezimal) werden entsprechend der einzelnen Stellenwerte (vgl. *Tabelle 1.1*) des Achter-Ziffernsystems aufgeteilt. Zuerst wird geprüft, welcher Stellenwert als Divisor für die umzuandelnde Zahl in Frage kommt. Der Stellenwert $8^1 = 8$ ist hier richtig. Durch diese Zahl lässt sich die Zahl 24 (dezimal) dividieren, dies gilt auch für die Zahl 17 (dezimal). (In den folgenden Beispielen wird zur Kennzeichnung des jeweiligen Ziffernsystems die Zahl mit der Basis des Ziffernsystems versehen, z. B. 2410, 1710, 318, 279 usw.) Bleibt nach der Division ein Rest, wird durch den nächstniedrigeren Stellenwert dividiert:

$$24 : 8 = \underline{\quad}$$

Rest 0

3 0
8¹ 8⁰

$$17 : 8 = \underline{\quad}$$

Rest 1

2 1
8¹ 8⁰

Nach dieser Umsetzung kann die Addition erfolgen:

$$\begin{array}{r}
 30_8 \\
 + 21_8 \\
 \hline
 \text{Übertrag } \underline{\quad} \\
 51_8 \rightarrow 5 \cdot 8^1 + 1 \cdot 8^0 = 40_{10} + 1_{10} = 41_{10}
 \end{array}$$

Bei dieser Addition wurde in keiner Stelle der Ziffernbereich überschritten. Es gibt also keinen Übertrag. Wiederholen wir daher dieses Rechenbeispiel im Dreier- und Zweier-Ziffernsystem:

$$\begin{array}{r}
 24 : 9 = \underline{\quad} \\
 \text{Rest } 6 : 3 = \underline{\quad} \\
 \text{Rest } 0 \quad \underline{\quad} \\
 \hline
 \text{2 2 0} \\
 \text{3}^2 \text{ 3}^1 \text{ 3}^0
 \end{array}$$

$$\begin{array}{r}
 17 : 9 = \underline{\quad} \\
 \text{Rest } 8 : 3 = \underline{\quad} \\
 \text{Rest } 2 \quad \underline{\quad} \\
 \hline
 \text{1 2 2} \\
 \text{3}^2 \text{ 3}^1 \text{ 3}^0
 \end{array}$$

Addition:

$$\begin{array}{r}
 220_3 \\
 + 122_3 \\
 \hline
 \text{Übertrag } \underline{11} \\
 1112_3 = 1 \cdot 3^3 + 1 \cdot 3^2 + 1 \cdot 3^1 + 2 \cdot 3^0 \\
 = 27_{10} + 9_{10} + 3_{10} + 2_{10} = 41_{10}
 \end{array}$$

Aus diesem Beispiel ist ersichtlich, dass der Ziffernbereich in den Stellen 3^1 und 3^2 überschritten wurde. In der Stelle 3^1 ergab die Summe $2 + 2 = 4$. Da der Ziffernbereich nur bis 3 geht, muss der Wert 3 (höchster Stellenwert) mit dem Ziffernwert 1 in die nächsthöhere Stelle 3^2 . Der Rest von $4 - 3 = 1$ verbleibt in der Stelle 3^1 . In der Stelle 3^2 muss dieser Übertrag hinzugaddiert werden. Als Summe ergibt sich dadurch wieder $1 + 1 + 2 = 4$. Dieses gibt wieder einen Übertrag in die Stelle 3^3 .

Im Zweier-Ziffernsystem wird bei der Umsetzung von Zahlen aus dem Zehner-Ziffernsystem genauso vorgegangen. Nur mit dem Unterschied, dass beim Dividieren gleich die Stellenwerte des Zweier-Ziffernsystems eingesetzt werden.

$$\begin{array}{r}
 24 : 16 = \underline{\quad} \\
 \text{Rest } 8 : 8 = \underline{\quad} \\
 \text{Rest } 0 = \underline{\quad} \\
 \begin{array}{r}
 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \\
 2^4 \ 2^3 \ 2^2 \ 2^1 \ 2^0
 \end{array}
 \end{array}$$

$$\begin{array}{r}
 17 : 16 = \underline{\quad} \\
 \text{Rest } 1 : 1 = \underline{\quad} \\
 \text{Rest } 0 \\
 \begin{array}{r}
 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \\
 2^4 \ 2^3 \ 2^2 \ 2^1 \ 2^0
 \end{array}
 \end{array}$$

In diesem Ziffernsystem muss beachtet werden, dass als Ziffernvorrat nur die Ziffern \emptyset und 1 vorhanden sind. Das Ergebnis darf beim Dividieren nie größer als 1 werden. Entsprechend hoch muss die Stellenwertigkeit gewählt werden. Bei der ersten Zahl 2^4 war dies der Stellenwert $1 \cdot 2^4 = 2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 2 = 16$. Bei der Zahl 17 war ebenfalls der Stellenwert 2^4 enthalten. Der Rest war nur noch in der Stelle 2^0 unterzubringen.

Addition: $2^4 \ 2^3 \ 2^2 \ 2^1 \ 2^0$

$$\begin{array}{r}
 1 \ 1 \ \emptyset \ \emptyset \ \emptyset_2 \\
 + 1 \ \emptyset \ \emptyset \ \emptyset \ 1_2
 \end{array}$$

$$\begin{array}{r}
 \text{Übertrag } 1 \\
 \hline
 1 \ \emptyset \ 1 \ \emptyset \ \emptyset \ 1
 \end{array}$$

$$\begin{aligned}
 &= 1 \cdot 2^5 + 0 \cdot 2^4 + 1 \cdot 2^3 + 0 \cdot 2^1 + 1 \cdot 2^0 \\
 &= 32_{10} + 0_{10} + 8_{10} + 0_{10} + 1_{10} \\
 &= 41_{10}
 \end{aligned}$$

Auch dieses Additionsbeispiel hat gezeigt, dass bei Überschreiten des Ziffernvorrats \emptyset und 1 ein Übertrag in die nächsthöhere Stelle erforderlich ist.

Bei all diesen Beispielen wird Ihnen aufgefallen sein, dass der nächsthöhere Stellenwert in jedem Ziffernsystem immer multipliziert um den Faktor der Basis höher ist als der vorangegangene Stellenwert, z. B.:

$$\begin{array}{lll}
 1 \cdot 2^4 = 16 & 1 \cdot 3^1 = 3 & 1 \cdot 8^2 = 64 \\
 1 \cdot 2^5 = 16 \cdot 2 = 32 & 1 \cdot 3^2 = 3 \cdot 3 = 9 & 1 \cdot 8^3 = 64 \cdot 8 = 512 \\
 1 \cdot 16^1 = 16 & 1 \cdot 4^3 = 64 & 1 \cdot 6^2 = 36 \\
 1 \cdot 16^2 = 16 \cdot 16 = 256 & 1 \cdot 4^4 = 64 \cdot 4 = 256 & 1 \cdot 6^3 = 36 \cdot 6 = 216
 \end{array}$$

Nachdem anhand einiger Beispiele die Ziffernsysteme dargestellt wurden, deren Ziffernvorrat kleiner als zehn ist, zeigen die nachfolgenden Beispiele die Umsetzungs- und Additionsvorgänge mit Ziffernsystemen, deren Ziffernvorrat *größer* als zehn ist. Dazu betrachten wir wieder das Additionsbeispiel mit den Zahlen 24 und 17.

Zuerst ein Beispiel aus dem Zwölfer-Ziffernsystem (*Tabelle 1.2*). Umsetzung: (Beachte: Für die zweistelligen Zahlen 10, 11 und 12 werden die einstelligen Buchstaben A, B und C eingesetzt.)

$$\begin{array}{r} 24 : 12 = \underline{\quad} \\ \text{Rest } 0 = \underline{\quad} \\ \hline 2 \quad 0 \\ 12^1 \quad 12^0 \end{array}$$

$$\begin{array}{r} 17 : 12 = \underline{\quad} \\ \text{Rest } 5 = \underline{\quad} \\ \hline 1 \quad 5 \\ 12^1 \quad 12^0 \end{array}$$

Addition:

$$\begin{array}{r} 12^1 \quad 12^0 \\ 2 \quad 0_{12} \\ + 1 \quad 5_{12} \\ \hline \end{array}$$

$$\text{Übertrag } \underline{\quad} = 3 \cdot 12^1 + 5 \cdot 12^0 = 36_{10} + 5_{10} = 41_{10}$$

Das folgende 16er-Ziffernsystem hat in der elektronischen Datenverarbeitung (EDV) und in der Mikroprozessortechnik besondere Bedeutung. Dort aber unter den Namen hexadezimales oder sedezeitmales Ziffernsystem!

Umsetzung:

$$\begin{array}{r} 24 : 16 = \underline{\quad} \\ \text{Rest } 8 = \underline{\quad} \\ \hline 1 \quad 8 \\ 16^1 \quad 16^0 \end{array}$$

$$\begin{array}{r} 17 : 16 = \underline{\quad} \\ \text{Rest } 1 = \underline{\quad} \\ \hline 1 \quad 1 \\ 16^1 \quad 16^0 \end{array}$$

Addition:

$$\begin{array}{r} 16^1 \quad 16^0 \\ 1 \quad 8_{16} \\ + 1 \quad 1_{16} \\ \hline \end{array}$$

$$\text{Übertrag } \underline{\quad} = 2 \cdot 16^1 + 9 \cdot 16^0 = 32_{10} + 9_{10} = 41_{10}$$

In diesen zwei Beispielen gab es keinen Übertrag, da der Ziffernbereich von 0 bis 9 in den einzelnen Stellen nicht überschritten wurde. Daher noch zwei Beispiele:

$$\begin{array}{r} 24_{16} \\ + 18_{16} \\ \hline \text{Übertrag } \underline{\quad} \end{array} \quad \begin{array}{r} 19_{16} \\ + 98_{16} \\ \hline \text{Übertrag } \underline{\quad} \end{array}$$

Im ersten Beispiel ergab die Summe von $8 + 4 = 12$ den einstelligen Wert C. Im zweiten Beispiel wurde in der ersten Stelle ($8 + 9 = 17$) der Ziffernvorrat von 16 Ziffern um eine Ziffer überschritten. Daher wurde für den Wert 16 ein Übertrag geschrieben und der Rest 1 als Summe in der ersten Stelle (16^0) eingetragen.

Tabelle 1.3: Darstellung vierstelliger Zweierzahlen als einstellige 16er-Ziffer

Zweier-Zahlen (Dualzahlen)					Sechzehner-Ziffern (Hexadezimale Ziffern)	Dezimal- zahlen	
Stellenwert	2^3	2^2	2^1	2^0	16^0	10^1	10^0
	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	1	1	0	1
	0	0	1	0	2	0	2
	0	0	1	1	3	0	3
	0	1	0	0	4	0	4
	0	1	0	1	5	0	5
	0	1	1	0	6	0	6
	0	1	1	1	7	0	7
	1	0	0	0	8	0	8
	1	0	0	1	9	0	9
	1	0	1	0	A	1	0
	1	0	1	1	B	1	1
	1	1	0	0	C	1	2
	1	1	0	1	D	1	3
	1	1	1	0	E	1	4
	1	1	1	1	F	1	5

Das 16er-Ziffernsystem ist insbesondere in der EDV die Kurzschreibweise des Zweier-Ziffernsystems. Der Vergleich dieser Ziffernsysteme in *Tabelle 1.1* und *Tabelle 1.2* zeigt, dass eine vierstellige Zweier-Zahl (Dualzahl) mit einer einstelligen 16er-Ziffer dargestellt werden kann, vgl. *Tabelle 1.3*.

In der Digitaltechnik wird vorwiegend im dualen Ziffernsystem gearbeitet, solange die Zahlen relativ klein sind, d. h., solange sie überschaubar sind. Eine vierstellige Zahl kann bei entsprechender Übung schnell übersehen und ausgewertet werden. Bei fünf Stellen und mehr ist dies nicht mehr möglich. Für standardisierte Datenwortbreiten, z. B. vierstelliges Datenwort oder achtstelliges Datenwort, gibt es standardisierte Eingabe- und Ausgabeeinheiten für die Umsetzung vom hexadezimalen Ziffernsystem in Dualzahlen und umgekehrt (Abb. 1.2). Aus *Tabelle 1.3* ist ersichtlich, dass für jeweils vier Stellen im dualen Ziffernsystem eine Stelle im sedezimalen (hexadezimalen) Ziffernsystem erforderlich ist:

dual	hexadezimal (sedezimal)
vierstellig	einstellig
achtstellig	zweistellig
zwölfstellig	dreistellig
sechzehnstellig	vierstellig

Die Umsetzung zwischen dem dualen und hexadezimalen Ziffernsystem ist ebenfalls nicht schwierig. Solange die Dualzahl nicht mehr als vier Stellen aufweist, setzt man

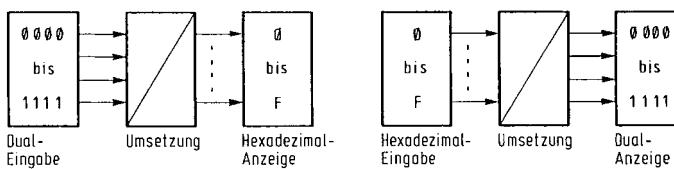


Abb. 1.2: Umsetzer (Decoder) für duale und hexadezimale Ziffernsysteme

entsprechend Tabelle 1.3 und bei etwas Übung leicht vom dualen ins sedezeitmale Ziffernsystem um.

Bei größeren dualen Datenwörtern teilt man die Dualzahlen in vierstellige Datenwörter, z. B.:

dual: 10101110101_2

In vierstellige Dualwörter aufgeteilt (von rechts nach links):

dual: $101\ 0111\ 0101$

hexadezimal: 5 7 5

dual: $1000\ 1011\ 1111$

hexadezimal: 8 B F

In dieser Form kann man auch vom hexadezimalen System ins duale System umsetzen.

hexadezimal: A B C D

dual: $1010\ 1011\ 1100\ 1101$

hexadezimal: 7 4 0 F 2

dual: $0111\ 0100\ 0000\ 1111\ 0010$

In der Fachsprache der Datentechniker haben Datenwörter bzw. Datenformate verschiedene Bezeichnungen: Der kleinste Stellenwert im dualen Ziffernsystem (Stellenwert 2^0) wird als Informationseinheit bezeichnet. Der Wert ist ein Bit. Eine zweistellige Dualzahl hat den Informationswert zwei Bit. Daraus ist ersichtlich, dass die Anzahl der Informationseinheiten von der Anzahl der Stellen abhängt. Genauso wie es im dezimalen Ziffernsystem Mengeneinheiten, wie z. B. deka = 10, kilo = 1000, gibt, so gibt es auch in der Datentechnik für die Informationseinheit verschiedene Mengenzeichen:

1 bit	$1_2 = 1_{16}$
4 bit (1 Halbbyte)	$1111_2 = F_{16}$
8 bit (1 Byte)	$11111111_2 = FF_{16}$
1024 bit (1 Kilobit)	$111111111111_2 = 3FF_{16}$
1024 Byte (1 Kilobyte)	$11111111111111_2 = 1FFF_{16}$

Das Datenformat „Byte“ wird vor allem bei Mikroprozessoren und bei der Angabe der Speicherkapazität von elektronischen Speichern eingesetzt.

Wird z. B. für einen Mikroprozessor mit einem Datenwortformat von acht bit (ein Byte), s. Abb. 1.3, die Speicherkapazität des Programmspeichers angegeben, so gibt man die Anzahl der Speicherplätze an, z. B. 1/4 Kilobyte oder 2 Kilobit.

In diesem Beispiel gilt folgende Aussage: Die Speicherkapazität beträgt 256 Speicherplätze zu je 8 bit (1 Byte) Datenwort.

Ergänzend muss hinzugefügt werden, dass ein Speicher das gleiche Datenformat aufweisen muss wie der dazu eingesetzte Mikroprozessor. Mit 1/4 Kilobyte ist die gesamte Speicherkapazität definiert ($1/4 \text{ K} \cdot 8 \text{ bit} = 2 \text{ Kilobit}$).

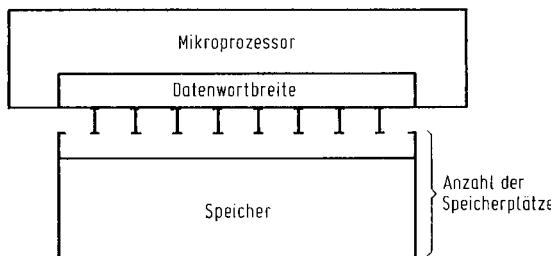


Abb. 1.3: Datenwortbreite eines Computers

1.2 Übungen

Abschließend zu dem Thema „Addition in Ziffernsystemen“ einige Übungsaufgaben (Lösungen in Teil 1A, Kapitel 9).

Addieren Sie in den jeweiligen Ziffernsystemen:

1.1)	11_3	1.2)	1010_2	1.3)	24_7	1.4)	44_5
	$+ 2_3$		$+ 1110_2$		$+ 62_7$		$+ 23_5$

Übertrag:

Summe:₃₂₇₅

Setzen Sie folgende Zahlen um:

- | | |
|----------------------------------|----------------------------------|
| 1.5) 27_{10} XXX_3 | 1.6) 56_{16} $XXXX_2$ |
| 1.7) 16_7 XXX_4 | 1.8) 1011_2 XX_{10} |
| 1.9) 1010111_2 XX_{16} | 1.10) AF_{16} XXX_{10} |
| 1.11) $5A_{11}$ XX_{10} | 1.12) $7C_{16}$ XXX_8 |

Addieren Sie im sedezimalen Ziffernsystem:

$$1.13) \quad \begin{array}{r} 27_{16} \\ + 1A_{16} \\ \hline \end{array} \quad 1.14) \quad \begin{array}{r} CA_{16} \\ + 9_{16} \\ \hline \end{array} \quad 1.15) \quad \begin{array}{r} FF_{16} \\ + F\emptyset_{16} \\ \hline \end{array} \quad 1.16) \quad \begin{array}{r} 80_{16} \\ + 80_{16} \\ \hline \end{array}$$

Übertrag:
Summe:₁₆₁₆₁₆₁₆

1.17) Ein Speicher hat 256 bit Speicherkapazität. Ein Datenwort hat das Format 1 Byte. Wie viele Adressen (Adressraum) hat dieser Speicher?

Antwort: Adressen

1.18) Wie viele Bytes haben 504 bit?

Antwort: Byte

1.19) Wie viele Adressen benötigt ein Speicher, der 1024 bit Speicherkapazität aufweist, die im Byte-Format adressiert sind?

Antwort: Adressen

1.20) Wie viele Kilobit sind 4096 bit?

Antwort: Kbit

Lösungen in Teil 1A, Kapitel 9

Nach so viel Theorie nun noch etwas Anwenderpraxis:

Ein Addierwerk, das nach den Rechenregeln des dualen Ziffernsystems arbeitet, erhält man als integrierten Baustein (Abkürzung: IC oder IS).

Abb. 1.4 zeigt einen 4-bit-Volladdierer des Typs SN 74283. Über eine Eingabetastatur können die Operanden A und B eingestellt werden. Der Eingang \ddot{U}_E (C^0) ist der

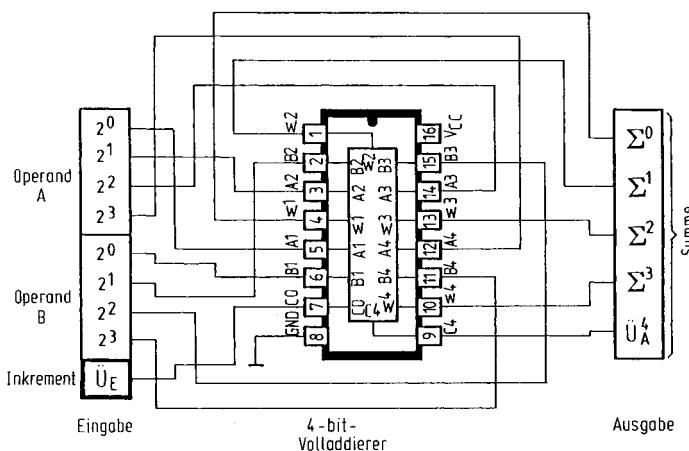


Abb. 1.4: Volladdierer mit 4 bit Datenwortbreite

sogenannte Übertragseingang (Inkrement). Wenn dieser Eingang auf logisch 1 gesetzt wird, erscheint am Ausgang Σ^0 ebenfalls logisch 1. Dieser Eingang hat die gleiche Wertigkeit wie der Operanden-Eingang 2^0 . Der Summenausgang Σ^4_A ist die fünfte Stelle im dualen Ziffernsystem. Dieser Ausgang geht dann auf logisch 1, wenn die Summe größer als 1111 an den Ausgängen Σ^0 bis Σ^3 ist.

Hierzu zwei Beispiele:

Wertigkeit:	$2^4 2^3 2^2 2^1 2^0$	$2^4 2^3 2^2 2^1 2^0$
Operand A:	$0 1 1 1$	$0 0 0 0 1$
Operand B:	$1 1 1 1$	$0 0 0 0 1$
Inkrement:	$1 $	$1 $
Übertrag:	$1 1 1$	$1 $
Ergebnis:	$1 0 1 1 1$	$0 0 0 1 1$

Zur Unterscheidung der Ziffer 0 vom Buchstaben O wird von datenverarbeitenden Anlagen die Ziffer 0 als durchgestrichene Ø ausgedruckt. Die Schaltung benötigt als Betriebsspannung +5 V am Anschluss 16. Bezugspotenzial 0 V ist der Anschluss 8.

1.3 Die Subtraktion in verschiedenen Ziffernsystemen

Für die Subtraktion von Zahlen in allen Ziffernsystemen gelten die selben Rechenregeln wie im Dezimalsystem.

Zuerst ein Beispiel ($25 - 17 = ?$) aus dem dezimalen Ziffernsystem, an dem wir uns die Regeln nochmals bewusst machen wollen:

$$\begin{array}{r}
 & (10) \\
 & \swarrow 15 \\
 2 & - 17 \\
 \hline
 \text{geliehen} & 1 \\
 \hline
 0 & 8_{10}
 \end{array}$$

Die Aufgabe zeigt, dass die Ziffer mit der Einer-Wertigkeit, die abgezogen werden soll, größer ist als die Ziffer der Zahl, von der subtrahiert werden soll ($5 - 7$). In diesem Fall lehnt man sich von der nächsthöheren Wertigkeit 10^1 die Ziffer 1 ($1 \cdot 10^1 = 10$).

Diese Zahl wird zur Ziffer 5 hinzugezählt ($10 + 5 = 15$). In der Einer-Stelle ergibt sich dann der folgende Rechenvorgang: $15 - 7 = 8$. Die „geliehene“ Ziffer 1 von der Zehner-Wertigkeit muss zur Ziffer 1 der Zahl 17 hinzugezählt werden ($1 + 1 = 2$).

2 Funktionen der Bauelemente in digitalen Schaltungen

Entsprechend den vielseitigen Anwendungsmöglichkeiten der Elektronik (Regel- und Steuerungstechnik, Energietechnik und Nachrichtentechnik) kommen eine Vielzahl von Bauelementen zur Anwendung, wie z. B. mechanische Schalter, Relais, Dioden, Vierschichtelemente, Bipolartransistoren und Feldeffekttransistoren sowie integrierte Schaltungen (Abk. IS oder IC).

Tabelle 2.1 zeigt eine Gegenüberstellung der wesentlichsten Bauelemente und ihre wichtigsten Kennwerte sowie Schalteigenschaften.

Tabelle 2.1:

Bezeichnung	Schalter	Relais	Diode	Thyristor	Transistor Emitterschaltung	FET Sourceschaltung
Schalt-symbole						
Kontaktart	mechanisch	elektro-mechanisch	elektrisch	elektronisch	elektronisch	elektronisch
Schalt-eigenschaft	prellt	prellt	prellfrei	prellfrei	prellfrei	prellfrei
Schaltzeit	ms	ms	μs	μs	μs	μs
Übergangs-widerstand im leitenden Zustand	mΩ	mΩ	1 Ω bis 10 Ω	10 Ω bis 100 Ω	mΩ bis Ω	0,1 kΩ bis 1 kΩ
Übergangs-widerstand im nichtleitenden Zustand	∞	∞	10 kΩ bis 1 MΩ	100 kΩ bis 1 MΩ	1 MΩ bis 10 MΩ	10 MΩ bis 100 MΩ
Potenziale (leitend)	U_B	U_B	0,4 V bis 0,8 V	1 V bis 3 V	0,2 V bis 0,3 V	0,5 V bis 1 V
Potenziale (nichtleitend)	≈ 0 V	≈ 0 V	U_B	$U_B \approx$ > 100 V	$U_B \approx$ 5 V bis > 50 V	$U_B \approx$ > 10 V
Last-widerstand	$R \approx \Omega$ bis MΩ	$R \approx \Omega$ bis MΩ	$R \approx 100 \Omega$ bis 100 kΩ	$R_k = 1 \Omega$ bis 1 kΩ	$R_a \approx 10 \Omega$ bis 100 kΩ	$R_a \approx 10 \text{ k}\Omega$ bis 1 MΩ

2.1 Elektrische Funktion eines Schalters

Die Funktion des *Schalters* wird in Form von Tastern für die Signaleingabe und als Drehschalter für eine Programmwahl benötigt. Ein Nachteil ist das *Nachprellen der Kontakte*, wenn ein Schalter geschlossen wird. Abb. 2.1 zeigt die dadurch entstehenden Auswirkungen. Durch das Vor- und Zurückprellen während der Einschaltphase wird der Stromkreis mehrmals geschlossen und geöffnet. Während dieser *Prellzeit* ($t_1 - t_2$) entstehen Impulse mit hohen Schaltfrequenzen, die von einer nachfolgenden digitalen Schaltung weiterverarbeitet werden. Daher werden Eingabeschalter oder Eingabetaster durch eine entsprechende Schaltung in Form eines Kondensators oder einer Schaltstufe entprellt.

Die gleichen Nachteile entstehen durch einen Relaiskontakt. Der Einsatz des *Relais* ist daher nur bedingt möglich, vor allem in Kombination mit schnell schaltenden elektronischen Bauelementen und Schaltkreisen.

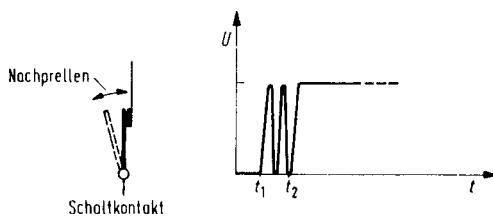


Abb. 2.1: Elektrische Auswirkung einer Kontaktprellung

2.2 Diode als Schalter

Die *Diode* findet vorwiegend in Logikschaltungen Anwendung. Für das Durchschalten der Diode ist ein ausreichendes Steuersignal erforderlich, das sowohl in seinen Spannungs- als auch Stromwerten nicht mehr verstärkt zu werden braucht. Die Diode ist ein passives Bauelement ohne Verstärkerwirkung (vgl. Grundlagen). Bei der Diode wird die Richtwirkung des Innenwiderstands in Abhängigkeit von der Polarität des angelegten Signals ausgenutzt. Die Funktion zeigt Abb. 2.2.

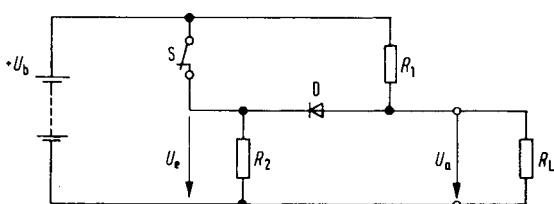


Abb. 2.2: Schalterfunktion der Diode

Solange der Schalter S geöffnet bleibt, ist die Diode leitend, da sie mit der Anode über den Widerstand R_1 am Pluspol der Stromquelle liegt und mit der Katode über den Widerstand R_2 am Minuspol der Stromquelle. Die Ausgangsspannung beträgt dann:

$$U_a = U_b - U_{R1} = U_F + U_{R2}$$

Dieser Zustand würde dem Binärsignal L (low) entsprechen. Wenn $U_e = 0 \text{ V} = \text{L}$ ist, dann entspricht U_a ebenfalls $0 \text{ V} = \text{L}$. Die Spannungen $U_F + U_{R2}$ werden bei dieser Betrachtungsweise ganz einfach vernachlässigt. Das digital-binäre Signal hat die zwei Amplitudenstufen H (high) und L (low). Damit ist der Informationsgehalt nicht wie beim analogen Signal vom Betrag der Amplitude selbst, sondern nur von deren Vorhanden- oder Nichtvorhandensein abhängig. Es ist daher bei einem digitalen Signal nicht kritisch, wenn die Amplitude des Signals um einige Prozent über oder unter dem Sollwert liegt. Geht man davon aus, dass an der Diode im leitenden Zustand etwa $U_F = 0,75 \text{ V}$ entsteht und der gleiche Spannungswert an $R_2 = 470 \Omega$ abfällt, dann würde U_a etwa $1,5 \text{ V}$ betragen. Damit nun dieser Spannungsanteil nicht mehr als 10 % der Gesamtspannung U_b ausmacht, muss diese mindestens 15 V betragen.

Der Widerstand R_1 muss dann etwa 20 mal größer als R_2 werden, also etwa $9 \text{ k}\Omega$.

Man sieht, dass die Dimensionierung dieser Schaltung relativ einfach ist. Die zulässigen Toleranzen sind meist sogar größer als $\pm 10 \text{ \%}$, z. B. bei TTL L = 0 V bis $1,4 \text{ V}$ und H = $3,5 \text{ V}$ bis $5,5 \text{ V}$.

Wird der Schalter S geschlossen, liegt am Eingang $U_e = U_b$. Diese Spannung liegt dann auch an der Katode der Diode, wodurch diese gesperrt wird. Die Spannung an der Anode wird kleiner, da durch den Widerstand R_1 ein kleiner Spannungsverlust entsteht, hervorgerufen durch den Sperrstrom der Diode. Am Ausgang entsteht dann die Spannung:

$$U_a = U_b - U_{R1}$$

Der Sperrwiderstand R_D der Diode ist größer als $1 \text{ M}\Omega$. Die Spannungsverluste an den Widerständen R_1 und R_2 können vernachlässigt werden, da sie kleiner als 10 % sind. Nicht vernachlässigt werden darf der Lastwiderstand R_L , der durch die nachfolgende Schaltung gebildet wird. Dieser Widerstand liegt in Reihe zu R_1 und bildet mit ihm einen Spannungsteiler. Um diese Wirkung zu vermeiden, muss der Widerstand R_L mindestens zehnmal größer sein als der Widerstand R_1 , in diesem Fall etwa $100 \text{ k}\Omega$. Der Spannungsverlust beträgt dann weniger als 10 % und kann vernachlässigt werden. Der damit erreichte Binärzustand würde dem Binärsignal H entsprechen.

Wenn U_e etwa U_b entsprechend H ist, dann ist U_a etwa U_b entsprechend H.

Benötigt man das binäre Signal H mit negativem Potenzial, dann braucht man in Abb. 2.2 lediglich die Diode und die Stromquelle umzupolen.

2.3 Transistor als Schalter

Transistoren und Feldeffekttransistoren werden in der Digitaltechnik zur Erzeugung binärer Signale ebenfalls in einer einem Schalter ähnlichen Funktion betrieben. Diese Bauelemente haben den Vorteil, dass gleichzeitig eine Strom- oder Spannungsverstärkung bzw. beides zusammen für das zu übertragende Signal erfolgt.

In der digitalen Schaltungstechnik gibt es zahlreiche Ansteuerungsmöglichkeiten und Schaltungsvarianten, die man kennen muss, da sie auf das binäre Ausgangssignal unterschiedliche Auswirkungen haben. Im Folgenden werden die wichtigsten Unterscheidungsmerkmale dargestellt. Ein Transistor wird in Schalterbetrieb nur in den beiden Zuständen „leitend“ oder „nichtleitend“ betrieben. Er übernimmt dabei annähernd die Funktionen eines mechanischen Schalters, der nur die Betriebszustände „geöffnet“ oder „geschlossen“ einnehmen kann (Abb. 2.3 a). Durch die volle Aussteuerung oder Übersteuerung der Basis wird die Ausgangsspannung am Kollektor nur ein- oder ausgeschaltet (Abb. 2.3 b). Die Funktion des Schalterbetriebes eines Transistors lässt sich aus dem I_C - U_{CE} -Kennlinienfeld in Abb. 2.3 c entnehmen.

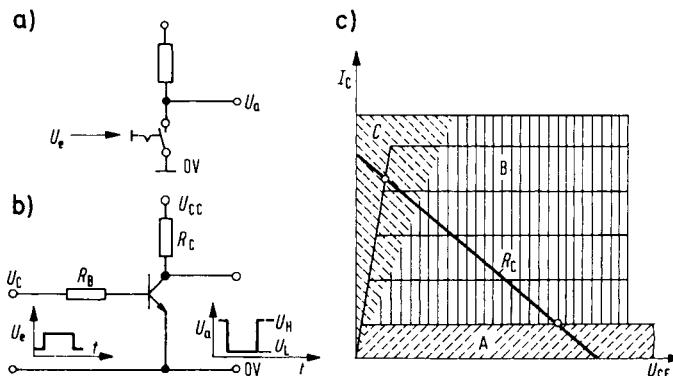


Abb. 2.3: Transistor im Schalterbetrieb

- a) Kontaktfunktion
- b) Spannungsfunktionen
- c) Lastwiderstand im Kennlinienfeld

Dabei unterscheidet man drei Arbeitsbereiche:

- A: *Sperrbereich*
Emitter- und Kollektordiode sind in Sperrrichtung gepolt. Der Transistor ist nichtleitend.
- B: *aktiver Bereich*
Das ist der Arbeitsbereich der Steuerkennlinie für Verstärkerbetrieb (lineare Steuerung). Die Emitter-Basis-Diode ist in Durchlassrichtung und die Kollektor-Basis-Diode in Sperrrichtung gepolt.
- C: *Übersteuerungsbereich*
Die Kollektorspannung hat soweit abgenommen, dass sie niedriger als die Basisspannung ist. Man nennt diesen Bereich auch Sättigungsbereich, der Transistor ist leitend.

Im Diagramm entsprechend Abb. 2.3 c werden die Bereiche A und B durch die Kennlinie für $I_B = 0$ abgegrenzt. Der Übergang von B nach C erfolgt an der Grenze für $U_{CB} = 0$, d. h. an der Stelle, an der $U_{CE} = U_{BE}$ geworden ist. Entsprechend der Widerstandsgeraden für R_C kann im Schalterbetrieb der Arbeitspunkt von A nach der Grenze C-B oder sogar bis C verschoben werden. Das zeitliche Verhalten beim Schaltvorgang wird von den Bereichen B und C beeinflusst.

Wird die Einschaltspannung so groß gewählt, dass der Arbeitspunkt in den Übersteuerungsbereich C verschoben wird, erhält man als Folge der Übersteuerung eine kleinere Anstiegszeit t_r , was oft erwünscht ist. Dagegen wird jedoch beim Abschalten die gesamte Abfallzeit $t_f + t_s$ größer, da zu der normalen Abfallzeit t_f noch die sogenannte Speicherzeit t_s hinzukommt (Abb. 2.4).

Nach dem Abschalten der Einschaltspannung bleibt der Kollektorstrom in gleicher Größe bestehen, weil die Basiszone durch Übersteuerung mit Ladungsträgern überchwemmt wurde und die Ladungsträger während der Speicherzeit t_s erst abfließen müssen, bis der normale Abfall erfolgen kann.

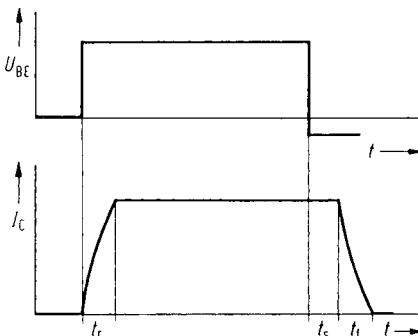


Abb. 2.4: Verhalten von Anstiegs- und Abfallzeit bei Übersteuerung des Transistors

Wie groß die Ausgangspegel U_L und U_H der Schaltung nach Abb. 2.3 b sind, ist von der angewandten Schaltungstechnik abhängig. Damit die Spannungspegel der Ausgangsspannung definiert werden können, sollen Spannungspegel zwischen U_H und U_L nicht auftreten. Für die Schaltung nach Abb. 2.3 b werden daher folgende Eigenschaften definiert:

$$U_e \text{ max. } U_L \text{ gibt } U_a \text{ min. } U_H$$

$$U_e \text{ min. } U_H \text{ gibt } U_a \text{ max. } U_L$$

Ist der Transistor in Abb. 2.3 b gesperrt, wird die Ausgangsspannung im unbelasteten Zustand gleich U_{CC} . Geht man von einem Lastwiderstand $R_L = R_C$ aus, dann wird $U_a = 0,5 \cdot U_{CC}$. Dies ist die kleinste Ausgangsspannung im H-Zustand. Bei einer Betriebsspannung von 5 V ergibt sich $U_H = 2,5$ V.

Für $U_a \text{ min. } U_H$ befindet sich die Eingangsspannung auf Pegel L. Als Pegel U_L wird die größte Eingangsspannung definiert, bei der der Transistor gerade noch sicher sperrt, also nichtleitend ist. Bei einem Siliziumtransistor liegt dieser Wert bei 0,4 V.

Die Schaltung muss nun so dimensioniert werden, dass sich für $U_e = U_H$ die Ausgangsspannung $U_a \text{ max. } U_L$ ergibt. Der Kollektorwiderstand R_L muss zum einen so klein sein, dass die Schaltzeiten klein werden, zum anderen darf die Stromaufnahme nicht zu groß werden. Für dieses Beispiel werden $R_C = 5 \text{ k}\Omega$ eingesetzt. R_B wird so groß gewählt, dass bei einer Eingangsspannung $U_e = 1,5$ V die Ausgangsspannung unter dem Wert $U_L = 0,4$ V liegt. Dazu muss ein Kollektorstrom von $I_C = U_{CC} / R_C = 1 \text{ mA}$ fließen. Der Transistor hat eine Stromverstärkung $B = 100$. Der notwendige Basisstrom beträgt dann $I_{Bmin} = I_C / B = 10 \mu\text{A}$. Um den Transistor sicher in die Sättigung zu bringen, wählt man 100 μA , also eine zehnfache Übersteuerung. Der Basiswiderstand kann dann wie folgt berechnet werden:

$$R_B = \frac{1,5 \text{ V} - 0,6 \text{ V}}{100 \mu\text{A}} = 9 \text{ k}\Omega$$

Bei dieser Dimensionierung ($R_C = 5 \text{ k}\Omega$, $R_B = 9 \text{ k}\Omega$) wird für $U_e = U_L = 0,4$ V die Ausgangsspannung $U_a = 2,5$ V. Für einen geforderten Minimalwert $U_H = 1,5$ V beträgt der Störabstand $S_H = 1$ V. Der Störabstand S_L liegt zwischen $U_L = 0,4$ V und U_{CESat} mit etwa 0,2 V und beträgt somit etwa 0,2 V.

Die Störabstände sind ein Maß für die Betriebssicherheit der Schaltung. Ihre Definition lautet:

$$S_H = U_a - U_H$$

$$S_L = U_L - U_a$$

Wenn der Störabstand S_L verbessert werden soll, muss U_L erhöht werden, da die Spannung U_{CESat} nicht nennenswert verringert werden kann.

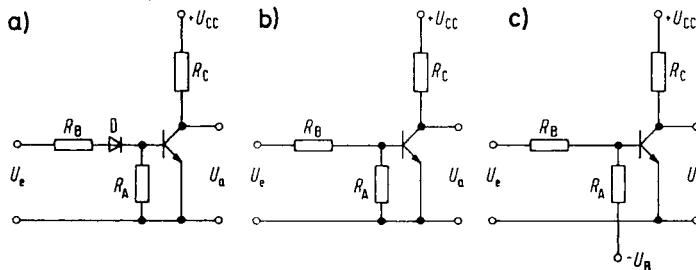


Abb. 2.5: Verbesserung des Störabstands

- a) Diode in der Basiszuleitung
- b) Spannungsteiler
- c) Spannungsteiler an Vorspannung

Schaltungsmöglichkeiten dazu zeigt Abb. 2.5. In Abb. 2.5 a sind eine oder mehrere Dioden vor die Basis geschaltet. Der Widerstand R_A dient zur Ableitung des Kollektor-Basis-Sperrstroms. Dadurch wird der Transistor sicher gesperrt.

Eine andere Möglichkeit besteht darin, einen Spannungsteiler vorzuschalten (Abb. 2.5 b und Abb. 2.5 c). In Abb. 2.5 c liegt der Widerstand R_A am Minuspotential. Der Störabstand wird dadurch noch weiter erhöht.

2.4 Definition der Schaltzeiten

Aufgrund der Umladungsträgheit von Zonenübergängen bei Dioden und Transistoren werden bei der Anwendung dieser Bauteile als Schalter die Schaltflanken am Ausgang gegenüber den Eingangswerten immer verzögert und dadurch verformt sein.

Auch wenn der steuernde Impuls eine sehr kurze Anstiegs- oder Abfallzeit hat, benötigt der Transistor eine bestimmte Zeit, um ein- oder auszuschalten. In Abb. 2.6 werden die einzelnen Zeiten definiert.

Die Bezeichnungen dieser Zeiten wurden aus der amerikanischen Literatur übernommen, weil diese am gebräuchlichsten sind:

- **Verzögerungszeit t_d** (delay time)
Nach dem Anschalten des Steuerstroms I_B vergeht eine bestimmte Zeit, bis der Ausgangsstrom I_C auf 10 % seines Endwerts angestiegen ist.
- **Anstiegszeit t_r** (rise time)
Dies ist die Flankenzeit, die der Strom benötigt, um von 10 % des Endwerts auf 90 % des Endwerts anzusteigen.

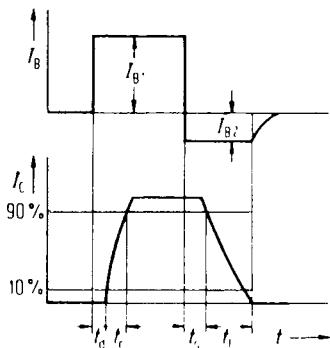


Abb. 2.6: Kennwerte eines rechteckförmigen Stromverlaufs am Transistor

- **Einschaltzeit t_{ein}**

Dies ist die Summe von t_d und t_r .

- **Speicherzeit t_s (storage time)**

Nach dem Abschalten des Steuerstroms vermindert sich der Kollektorstrom auf 90 % seines Maximalwerts.

- **Abfallzeit t_f (fall time)**

Das ist die Flankenzeit, die der Strom benötigt, um von 90 % des Endwerts auf 10 % abzusinken.

- **Ausschaltzeit t_{aus}**

Das ist die Summe aus Speicherzeit und Abfallzeit.

Die Speicherzeit t_s ist wesentlich größer als die anderen Schaltzeiten. Sie tritt dann auf, wenn ein gesättigter Transistor ($U_{CE} = U_{CEsat}$) gesperrt wird. Ist die Spannung U_{CE} des leitenden Transistors größer als U_{CEsat} , verringert sich die Speicherzeit t_s erheblich.

Bei schnellen Schaltvorgängen vermeidet man daher das Durchschalten auf U_{CEsat} . Schaltungen, die nach diesem Kriterium ausgelegt sind, werden als *ungesättigte Logikschaltungen* bezeichnet. Das Zeitverhalten von Digitalschaltungen wird durch die Gatterlaufzeit t_{pd} (propagation delay time) definiert:

$$t_{pd} = \frac{t_{pdL} + t_{pdH}}{2}$$

Die Größe t_{pdL} resultiert aus der Zeitdifferenz zwischen dem 50 %-Wert der ansteigenden Eingangsflanke und dem 50 %-Wert der abfallenden Ausgangsflanke. Die Größe t_{pdH} ist die entsprechende Zeitdifferenz bei der ansteigenden Ausgangsflanke und der abfallenden Eingangsflanke (Abb. 2.7).

Der H-Pegel der Schaltstufen in Abb. 2.3 und Abb. 2.5 ist stark belastungsabhängig. Dies kann vermieden werden, wenn man der Schaltstufe einen Emitterfolger nach-

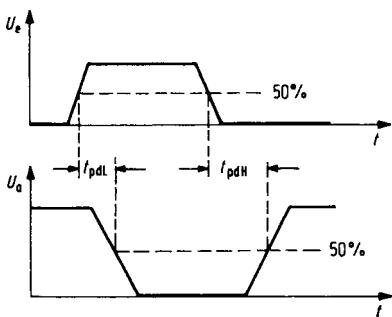


Abb. 2.7: Einfluss der Gatterlaufzeit

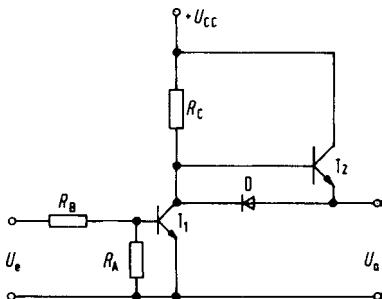


Abb. 2.8: Schaltungsmaßnahmen zur Verminde-
rung der Gatterlaufzeit

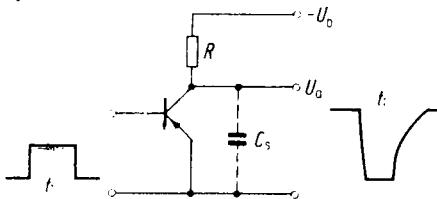
schaltet. In Abb. 2.8 fließt der Ausgangstrom über den Emitterfolger T2, wenn Transistor T1 sperrt. Dadurch bleibt die Belastung des Kollektorwiderstands R_C gering. Wird T1 leitend, verringert sich die Kollektorspannung. Bei ohmscher Ausgangsbelastung verringert sich die Ausgangsspannung ebenso. Bei kapazitiver Belastung muss die Schaltung den Entladestrom des Kondensators aufnehmen. Der Transistor T2 würde dadurch nichtleitend. Dies verhindert die Diode D, die den Entladestrom über den leitenden Transistor T1 abfließen lässt. Durch die Schwellenspannung der Diode erhöht sich die Ausgangsspannung im L-Zustand auf etwa 0,8 V.

2.5 Emitterschaltung im Schalterbetrieb

Einer Schaltstufe entspricht die Emitterschaltung in Abb. 2.9. Wir betrachten bei dieser Grundschaltung den Spannungsverlauf von U_C am Kollektor eines npn-Transistors, der an der Basis durch einen idealen Rechteckimpuls der Dauer t_i voll durchgesteuert wird.

In der Kollektorzuleitung befindet sich der Arbeitswiderstand R_C . Parallel zum Transistor liegt die unvermeidliche Transistor- und Schaltkapazität C_S (Abb. 2.9).

a)



b)

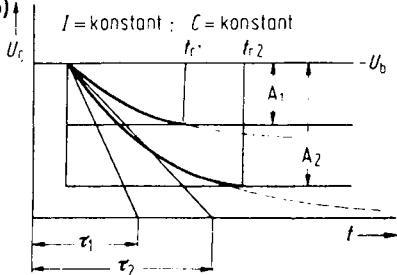


Abb. 2.9: Emitterschaltung
 a) mit kapazitiver Ausgangsbelastung
 b) Zusammenhang zwischen Impulsamplitude und Anstiegszeit

Obwohl von einer idealen Rechteckspannung an der Basis des Transistors ausgegangen wird, ist das Ausgangssignal keineswegs ideal rechteckig. Dies hat folgenden Grund:

Die Lade- und Entladezeit eines RC -Glieds wird mit dem Fünffachen der Zeitkonstante definiert, das Vorhanden sein eines RC -Glieds verhindert also grundsätzlich ideale Flanken. Diese Überlegung bedeutet, dass die Flankensteilheit von der Kapazität im Kollektorkreis abhängt.

Der nächste Impuls darf erst beginnen, wenn der vorhergehende abgeklungen ist. Dies ist davon abhängig, wie groß der Arbeitswiderstand gewählt wird (Abb. 2.9 b). Die Flankensteilheit, insbesondere zu Beginn des Impulses, lässt sich dadurch jedoch nicht beeinflussen. Sie kann nur verbessert werden, wenn es gelingt, die Kapazität C_s zu verkleinern. Dazu wählt man einen Transistor mit höherer Grenzfrequenz und/oder kleinerer Verlustleistung.

2.6 Kollektorschaltung im Schalterbetrieb

Bei allen Anwenderschaltungen, wo man die Belastung einer Spannungsquelle durch niederohmige Lastwiderstände oder größere Schaltkapazitäten vermeiden will, setzt man Kollektorschaltungen als Trennstufen ein. Diese auch als Emitterfolger bezeichnete Schaltung hat einen großen Eingangswiderstand und einen kleinen Ausgangswiderstand. Dabei muss aber berücksichtigt werden, dass man diese Schal-

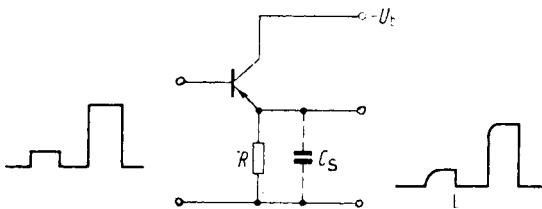


Abb. 2.10: Kollektorschaltung an unterschiedlichen Impulsamplituden

tung nicht bedenkenlos einsetzen und beliebig belasten darf, insbesondere bei der Ansteuerung mit Impulsen.

Die Kollektorschaltung hat die Eigenschaft, bei großen Impulsamplituden und großer kapazitiver Belastung die Anstiegs- und Abstiegsflanke nicht im gleichen Maße zu übertragen. Bei der Anstiegsflanke nach positiver Spannung wird die in Abb. 2.10 dargestellte pnp-Transistorstufe nichtleitend, also gesperrt.

In diesem Fall wird die Anstiegsflanke nur durch R und C bestimmt, und die größte Anstiegsgeschwindigkeit ist $(U / R) \cdot C$. Bei einem npn-Transistor würden diese Eigenschaften bei der Abstiegsflanke auftreten. Somit lässt sich feststellen, dass für große Signale die Kollektorschaltung nicht schneller schaltet als die Emitterschaltung. Für kleine Signale hat der Transistor eine Ausgangsimpedanz, die sehr niedrig ist. Anstiegs- und Abfallzeit sind etwa gleich und – da der Ausgangswiderstand sehr klein ist – recht kurz. Die Kollektorschaltung eignet sich daher besonders für Impulse bis zu 0,5 V, die an einer kapazitiven Last schnell geschaltet werden sollen.

2.7 Transistorschalter bei induktiver und kapazitiver Last

Befindet sich ein ohmscher Widerstand R_L im Kollektorkreis, so sind alle Arbeitspunkte möglich, die auf der Arbeitsgeraden für den Widerstand R_L liegen (Abb. 2.11). Die Leistungshyperbel wird bei richtiger Dimensionierung der Schaltung höchstens berührt, jedoch nicht geschnitten bzw. überschritten, solange sich an den Betriebsbedingungen (Spannung, Temperatur o. ä.) nichts ändert.

Ganz anders ist die Beanspruchung des Transistors, wenn der Lastwiderstand einen induktiven Anteil enthält, z. B. bei einem Relais.

Im Augenblick des Einschaltens wird der Strom in der Spule vergrößert. Die Vergrößerung des Stroms hat an den Klemmen der Induktivität eine Selbstinduktionsspannung zur Folge, die der anliegenden Spannung entgegenwirkt. Die Spule zeigt somit bei Stromänderung ihren induktiven Widerstand. Als Lastwiderstand wirken

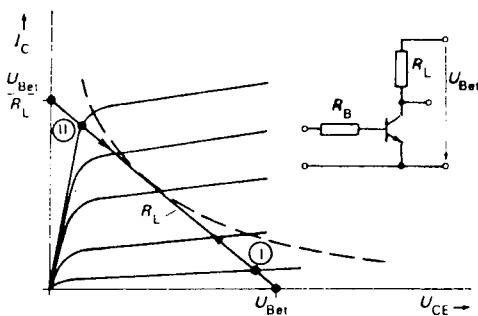


Abb. 2.11: Ohmscher Widerstand im Kollektorstromkreis

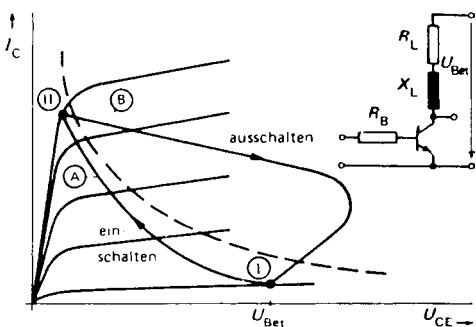


Abb. 2.12: Induktiver Widerstand im Kollektorstromkreis

daher im Einschaltmoment der ohmsche und der induktive Widerstand. Bei einem großen Lastwiderstand steigt die Widerstandsgerade sehr flach an. Daher beginnt die Kurve mit flacher Steigung im Punkt I. Mit abnehmender Kollektorstromänderung wird der induktive Widerstand kleiner, bis er schließlich zu null wird. Der Einschaltzustand im Punkt II wird durch den ohmschen Anteil R_L bestimmt. Alle möglichen Arbeitspunkte beim Einschalten liegen auf dem Teil A der Kurve in Abb. 2.12.

Beim Ausschalten wird der Kollektorstrom kleiner. Dadurch entsteht an den Klemmen der Spule eine Selbstinduktionsspannung, die den ursprünglichen Kollektorstrom aufrechtzuerhalten sucht.

Da der Stromkreis nach dem Ausschalten unterbrochen ist, können bei kurzen Abschaltzeiten sehr hohe Spannungen an den Klemmen der Spule auftreten (Teil B der Kurve in Abb. 2.12).

Beim Schalten induktiver Lastwiderstände wird der Schalttransistor im Moment des Einschaltens durch Überspannungen gefährdet.

Die Induktionsspannung einer Spule mit der Induktivität L bei Änderung des Spulenstroms ΔI in der Zeit Δt errechnet sich aus:

$$U_{ind} = \frac{L \cdot \Delta I}{\Delta t}$$

Beispiel:

Die Induktivität der Spule im Lastkreis eines Transistors beträgt $L = 0,1 \text{ H}$; der Kollektorstrom ändert sich in $2 \mu\text{s}$ um 10 mA . Wie groß ist die induzierte Spannung in der Spule?

Nach der obigen Gleichung ergibt sich folgende Lösung:

$$U_{ind} = 0,1 \text{ H} \cdot \frac{10 \text{ mA}}{2 \mu\text{s}} = 500 \text{ V}$$

Spannungen dieser Höhe würden den Transistor zerstören. Daher müssen Schalttransistoren, die induktive Last schalten, durch besondere Schaltungsmaßnahmen geschützt werden.

Zur Spannungsbegrenzung am Transistor beim Schalten induktiver Lastwiderstände sind mehrere Schaltungsmaßnahmen möglich. Eine häufig angewendete Schaltung zeigt Abb. 2.13 a). Im Ausschaltmoment hat die Induktionsspannung des induktiven Widerstands X_L eine Richtung, die den Kollektorstrom I_C aufrechterhält. Der positive Pol der Selbstinduktionsspannung liegt daher am Punkt 2 und der negative Pol am Punkt 1 in Abb. 2.13 a). Für die Selbstinduktionsspannung ist die

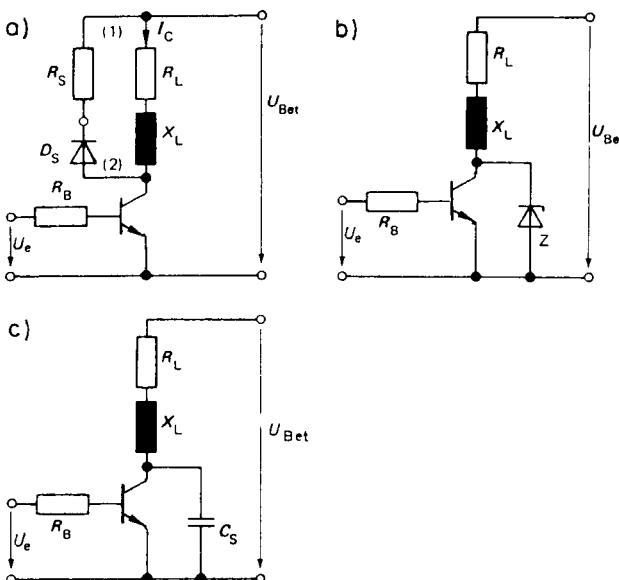


Abb. 2.13: Schutzschaltung für induktive Last
a) Freilaufdiode
b) Z-Diode
c) Kondensator

Schutzdiode D_S (auch als Freilaufdiode bezeichnet) in Durchlassrichtung geschaltet. Der induktive Widerstand X_L kann seine gespeicherte Energie abgeben. Zur Strombegrenzung für die Diode D_S wird der Schutzwiderstand R_S in Reihe geschaltet.

Eine andere Schaltungsvariante zum Schutz des Schalttransistors zeigt Abb. 2.13 b. Parallel zum Transistor ist eine Z-Diode geschaltet. Die Z-Spannung muss unterhalb der Durchbruchsspannung des Transistors liegen. Die jeweilige Durchbruchsspannung eines Transistors ist aus einem Datenblatt als Grenzwert zu entnehmen.

In Fernsehgeräten hat sich die Schaltung nach Abb. 2.13 c bewährt. Der zum Transistor parallel geschaltete Kondensator C_S nimmt beim Abschalten die Energie der Spule auf (Kurzschlussbelastung).

Beim Schalten kapazitiver Widerstände bewegt sich der Arbeitspunkt ebenfalls nicht auf einer geradlinigen Verbindung zwischen den Punkten I und II (Abb. 2.14).

Im Moment des Einschaltens hat der ungeladene Kondensator den Widerstand null. Der Transistor arbeitet im Kurzschlussbetrieb. Deshalb steigt bei konstanter Kollektorspannung der Kollektorstrom (Einschaltkennlinie A in Abb. 2.14) steil an. Mit zunehmender Ladung des Kondensators sinkt der Strom, der Verlauf der Einschaltkennlinie A wird daher flacher und schließlich durch die Kennlinie für I_{B1} begrenzt. Nach dem Abschalten fällt am Widerstand R_L keine Spannung mehr ab. Der Kondensator entlädt sich über den Widerstand R_L und erzeugt an ihm einen Spannungsabfall. Diese Entladespannung am Widerstand R_L wirkt der Betriebsspannung U_B entgegen, sodass die Spannung U_{CE} langsam auf den Wert U_B ansteigt. Diese Funktion zeigt die Ausschaltkennlinie B in Abb. 2.14.

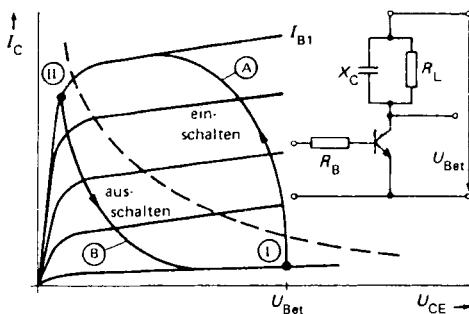


Abb. 2.14: Funktion bei kapazitiver Last

2 Grundlagen der Nachrichten- und Übertragungstechnik

In der Übertragungstechnik vollzieht sich ein tiefgreifender Wandel durch die Digitalisierung des Nachrichtennetzes und den Einsatz breitbandiger Netze zur Verwirklichung neuer Teilnehmerdienste. Digitale Vermittlungssysteme führen zum Zusammenwachsen vermittlungstechnischer und übertragungstechnischer Funktionen, die bisher völlig getrennt waren.

Obwohl die optische Nachrichtenübertragung sich rasch entwickelte und dort, wo neue Kabel installiert sind, bereits Kosten- und Qualitätsvorteile bietet, werden sowohl Kupfer-Doppelkabel (vgl. Abb. 1.6) als auch Kupfer-Koaxialkabel, die weltweit schon in großer Menge verlegt sind, noch für viele Jahre weiter vorherrschen. Viele dieser Kabel sind nicht mit Trägerfrequenzsystemen ausgerüstet und bieten sich daher für eine Nutzung mit Pulscodemodulations-Übertragungssystemen (PCM) unterschiedlicher Übertragungsgeschwindigkeiten an. Solche Systeme werden im Bereich von Zehnkanaleinrichtungen mit 0,7 Mbit/s für dünn besiedelte Gebiete und mit 56 Mbit/s für als Hochgeschwindigkeitssysteme über Koaxialkabel eingesetzt.

Bei neu einzurichtenden Strecken werden in zunehmendem Maße Koaxialkabel-Übertragungssysteme durch Systeme der optischen Nachrichtentechnik abgelöst. Wobei nicht abzusehen ist, ob die optischen Multimoden- oder die Monomoden-technik zum Standard wird. Mit Monomodenfasern erreicht man die höchste Übertragungskapazität (565 Mbit/s und darüber). Unter 140 Mbit/s hat das Multimodensystem Vorteile.

Richtfunk-Übertragungssysteme mit ihren besonderen Vorteilen und Anwendungsbereichen werden wohl durch die Einführung der optischen Nachrichtentechnik nicht berührt werden. Auch hier ist die Digitalisierung vorangeschritten. Durch Einführung verbesserter Modulationsverfahren wird die Kapazität der Systeme noch gesteigert.

In integrierten Nachrichtennetzen wird sich die Übertragungstechnik vor allem auf Glasfaserkabel stützen. Richtfunk- und Satellitenstrecken sind nur für große Entfer-nungen ökonomische Übertragungswege.

2.1 Schwingungen und ihre Übertragungseigenschaften

Die von den Sendern ausgestrahlten elektromagnetischen Wellen sind verschieden lang. Lange Wellen haben eine niedrigere Frequenz, d. h., sie schwingen langsamer, sie machen in einer Sekunde weniger Schwingungen als kurze Wellen. Aber alle elektromagnetischen Schwingungen haben die gleiche Ausbreitungs- oder Fortpflanzungsgeschwindigkeit. Lichtwellen, Wärmewellen, Sendewellen legen in einer Sekunde einen Weg von 300.000 km im Vakuum zurück, d. h., sie haben dort eine Geschwindigkeit von 300.000 km/s.

Da die einzelnen Wellen verschieden schnell schwingen – bei gleicher Fortpflanzungsgeschwindigkeit (300.000 km/s) –, besteht zwischen Wellenlänge und Frequenz ein Zusammenhang (Abb. 2.1):

$$\text{Frequenz} = \frac{\text{Wegstrecke pro Sekunde}}{\text{Wellenlänge}}$$

$$f \text{ in Hz} = \frac{300.000 \text{ km/s}}{\text{Wellenlänge in km}}$$

Entsprechend kann bei gegebener Frequenz die Wellenlänge bestimmt werden:

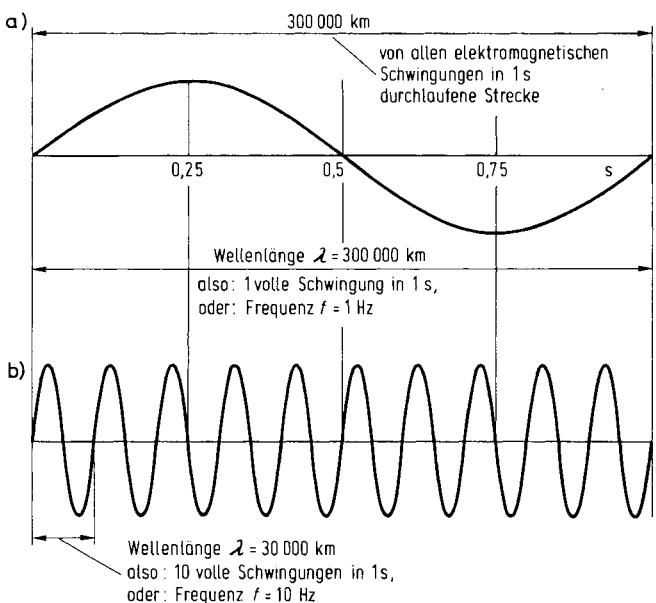


Abb. 2.1: Zusammenhang zwischen Frequenz und Wellenlänge

$$\text{Wellenlänge in km} = \frac{300.000 \text{ km/s}}{f \text{ in Hz}}$$

Sender strahlen grundsätzlich hochfrequente Wellen ab, wegen besserer Übertragungseigenschaften.

Rundfunkwellen haben Frequenzen zwischen 150 kHz und 300 MHz und dementsprechend Wellenlängen von etwa 2000 m bis 1 m. Die Abhängigkeit der Wellenlänge von der Frequenz ist für die Hochfrequenztechnik in *Tabelle 2.1* zusammengestellt.

Tabelle 2.1: Wellenlänge und Frequenz hochfrequenter Schwingungen (für 1 Milliarde Hz setzt man 1 Gigahertz, abgekürzt GHz)

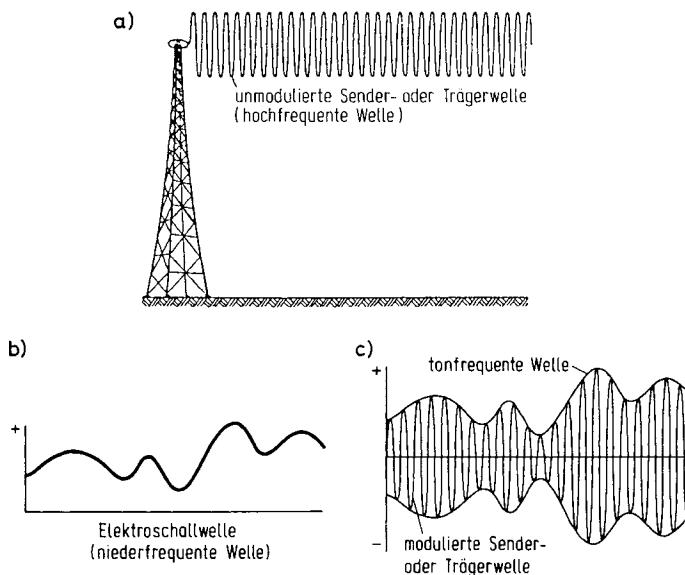
Wellenlänge	Frequenz
30 km	10.000 Hz = 10 kHz
10 km	30.000 Hz = 30 kHz
6000 m	50.000 Hz = 50 kHz
3000 m	100.000 Hz = 100 kHz
1000 m	300.000 Hz = 300 kHz
600 m	500.000 Hz = 500 kHz
300 m	1 Mio. Hz = 1000 kHz = 1 MHz
300 m	3 Mio. Hz = 3000 kHz = 3 MHz
60 m	5 Mio. = 5 MHz
30 m	10 Mio. Hz = 10 MHz
10 m	30 Mio. Hz = 30 MHz
6 m	50 Mio. Hz = 50 MHz
3 m	100 Mio. Hz = 100 MHz
1 m	300 Mio. Hz = 300 MHz
60 cm	500 Mio. Hz = 500 MHz
30 cm	1 Mrd. Hz = 1000 MHz = 1 GHz
10 cm	3 Mrd. Hz = 3000 MHz = 3 GHz
6 cm	5 Mrd. Hz = 5 GHz
3 cm	10 Mrd. Hz = 10 GHz
1 cm	30 Mrd. Hz = 30 GHz
6 mm	50 Mrd. Hz = 50 GHz
3 mm	100 Mrd. Hz = 100 GHz
1 mm	300 Mrd. Hz = 300 GHz
6 mm	500 Mrd. Hz = 500 GHz
3 mm	1 Bio. Hz = 1000 GHz
1 mm	3 Bio. Hz = 3000 GHz

Tabelle 2.2: Bereiche der Rundfunkwellen

Bezeichnung	Wellenlänge	Frequenz
Langwellen	2000 m bis 1000 m	150 kHz bis 300 kHz
Mittelwellen	600 m bis 200 m	500 kHz bis 1500 kHz
Kurzwellen	60 m bis 10 m	5 MHz bis 30 MHz
Ultrakurzwellen	10 m bis 1 m	30 MHz bis 300 MHz

Die Einteilung der Rundfunkwellen, deren Bezeichnungen sowie Bereiche (Frequenzabstand) ist in *Tabelle 2.2* zusammengefasst. Wie viele Sender in den jeweiligen Frequenzbändern arbeiten können oder dürfen, ist durch die Übertragungsbandbreite festgelegt. Im Mittelwellenbereich beträgt die Bandbreite 9 kHz. Im Kurzwellenbereich stehen als Bandbreite 10 kHz zur Verfügung.

Jeder Sender strahlt eine bestimmte hochfrequente Trägerfrequenz aus. Die zu übertragenden niederfrequenten Schallwellen (Wörter, Musik, Geräusche) werden dieser Trägerfrequenz mitgegeben, d. h. aufmoduliert (vgl. *Abb. 2.2*).

**Abb. 2.2:** Ausstrahlung von Wellen

- a) Trägerfrequenz (TF)
- b) Niederfrequenz (NF)
- c) Amplitudenmodulation (AM)

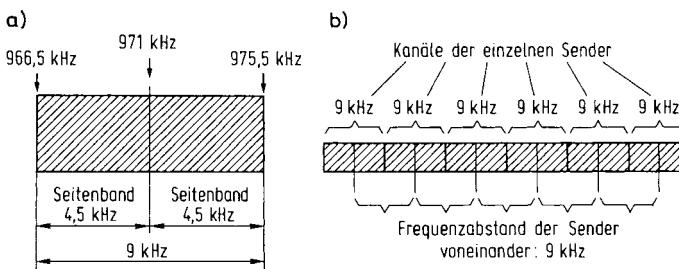


Abb. 2.3: Trägerfrequenzband
a) Seitenbänder
b) Kanalabstände

Dazu müssen Ton oder auch Bilder in elektrische Signale umgewandelt werden. Diese Umwandlung erfolgt beim Ton über das Mikrofon, bei Bildaufnahmen über die Videokamera. In *Abb. 2.2 a* ist die unmodulierte Trägerfrequenz dargestellt. *Abb. 2.2 b* zeigt die niederfrequente Schwingung und *Abb. 2.2 c* die resultierende Amplitudenmodulation (AM). Daneben gibt es noch die Frequenzmodulation (FM) und die Pulscodemodulation (PCM). Darüber wird in einem gesonderten Abschnitt gesprochen.

Durch die Frequenzbreite der der Trägerfrequenz mitgegebenen niederfrequenten Schwingungen wird die Trägerfrequenz nach beiden Seiten zu einem Band auseinandergezogen. Die Bandstücke rechts und links neben der Grundfrequenz (in *Abb. 2.3 a* und *Abb. 2.3 b* die Bandstücke von 971 kHz bis 975,5 kHz und von 966,5 kHz bis 971 kHz) nennt man die *Seitenbänder*. Die geringe Tonfrequenzbreite von $4,5 \text{ kHz} = 4500 \text{ Hz}$ geht zu Lasten der Tonqualität. Zwar reicht ein Frequenzspielraum von 4500 Hz aus, um die Grundtöne sämtlicher Instrumente zu übertragen (Klavier hat den Grundtonumfang 4100 Hz), die Obertöne jedoch, die z. T. mit höheren Frequenzen schwingen (Vielfache der Grundtöne) und die Klangfarbe des Instruments bestimmen, werden nicht voll übertragen bzw. unterdrückt.

Ein ebenfalls unerwünschter Nebeneffekt tritt bei der *Mischung verschiedener Frequenzen* auf. Wie *Abb. 2.4* zeigt, addieren sich die Wellen zu einer resultierenden Welle, die allerdings nichts mehr mit den einzelnen Wellenverläufen, den Amplituden und Vorzeichen der einzelnen Amplitudenwerte gemeinsam hat.

Das Zusammenwirken von zwei und mehr Wellen nennt man *Interferenz*. Zwei oder mehrere Wellen interferieren, wenn sie sich gegenseitig beeinflussen.

Jeder Sender strahlt seine elektromagnetischen Wellen nach allen Richtungen hin aus; es sei denn, dass eine Strahlenrichtung durch besondere Maßnahmen (z. B. Richtfunk) eingeschränkt wird. Läuft ein Teil der ausgestrahlten Wellen fast parallel mit der Erdoberfläche, spricht man von *Bodenwellen*. Bei den Langwellensendern kommt den Bodenwellen eine große Bedeutung zu. Bei Kurzwellensendern gelangt hingegen der Hauptteil der ausgestrahlten Wellen in die Atmosphäre, daher spricht

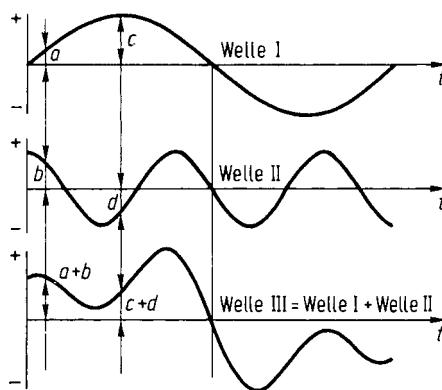


Abb. 2.4: Interferenz

man von *Raumwellen*. Sie werden von einer leitenden Schicht der Atmosphäre reflektiert und gelangen dadurch zur Erdoberfläche zurück. Diese Schicht, die Ionosphäre, wird wiederum in verschiedene Schichten eingeteilt (Abb. 2.5). Darunter liegen die Stratosphäre und die Troposphäre.

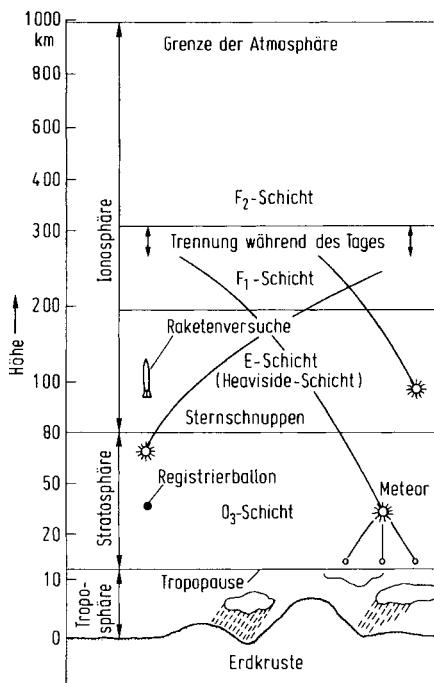


Abb. 2.5: Atmosphärische Schichten

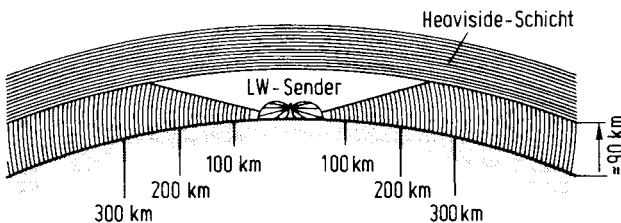


Abb. 2.6: Die Ausbreitung der Langwellen (LW) erfolgt im Wesentlichen mit der Bodenwelle.

Die Ionosphäre wirkt also als Spiegel oder Reflektor für die Raumwellen.

Über der E-Schicht breiten sich zwei weitere Schichten aus, die F_1 - und F_2 -Schicht in etwa 200 km bzw. 300 km Höhe. Die Unterteilung erfolgt, da die Reflexionsfähigkeiten sich unterscheiden. Die Gase, aus denen die Schichten bestehen, werden durch das Auftreffen von Sonnenstrahlen ionisiert, d. h. leitfähig gemacht. Dadurch ist die Reflexionsfähigkeit von den Tageszeiten abhängig.

Je kürzer die Wellen sind, je höher also die Frequenz ist, desto geringer ist die Reflexion der Ionisationsschichten. Wellen unter 10 m Länge (UKW, Fernsehen und Richtfunk), also Frequenzen über 30 MHz, werden nicht mehr reflektiert, sondern können nur noch durch direkte Ausbreitung genutzt werden (Richtantennen).

2.1.1 Lange Wellen

Für Langwellen wirkt die Ionosphäre nicht als reflektierender Spiegel, denn diese Wellen folgen der Erdoberfläche. Bei Tage ist die Reichweite der Bodenwellen geringer als bei Nacht, sodass meist nur Nahempfang möglich ist. Nachts setzt der Fernempfang ein.

2.1.2 Mittlere Wellen

Auch die Mittelwellen sind vor allem Bodenwellen. Nur ein kleiner Teil wird als Raumwelle abgestrahlt (Abb. 2.7 a und Abb. 2.7 b). Der Empfang kann erheblich eingeschränkt sein, wenn Raum- und Bodenwelle sich überlagern (Fading). Weiter kann sich eine sogenannte tote Zone zwischen Ende des Bodenwellenempfangs und Beginn des Raumwellenempfangs ausbilden – hier ist kein Empfang möglich.

2.1.3 Kurze Wellen

Kurzwellen sind für den Nahempfang ungeeignet, da sie zum größten Teil als Raumwelle abgestrahlt werden. Trotzdem kann man auch hier ab und an eine tote

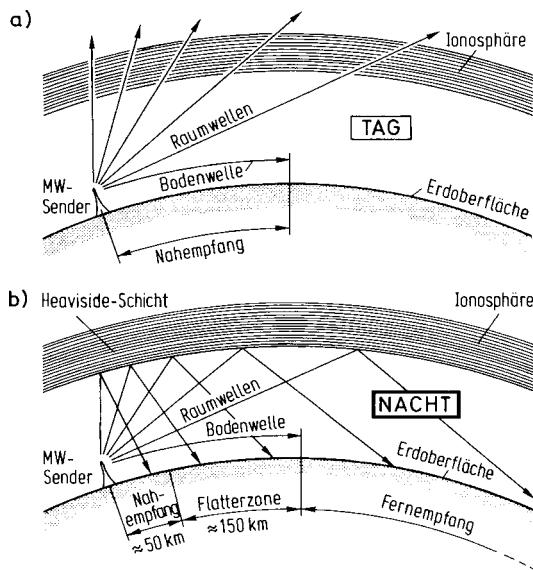


Abb. 2.7: Ausbreitung der Mittelwellen (MW)
a) bei Tag
b) bei Nacht

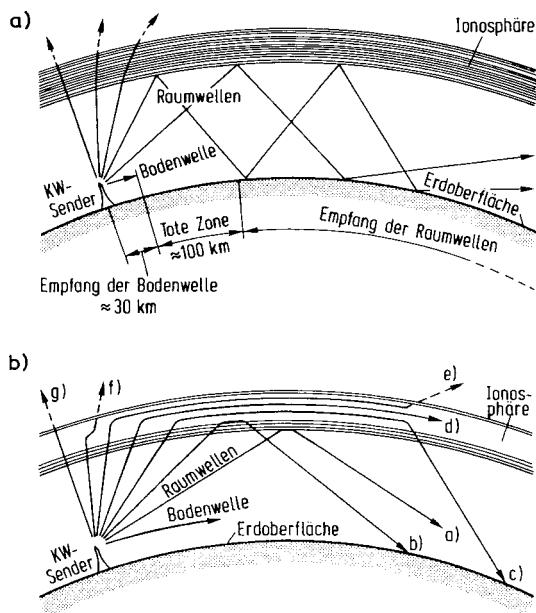


Abb. 2.8: Ausbreitung der Kurzwellen (KW)
a) tote Zone
b) Raumwellen

Zone beobachten. In diesem Bereich sind die Bodenwellen nicht mehr empfangbar, und die Raumwellen treten hier noch nicht auf. Die Raumwellen können mehrmals

reflektiert werden (Abb. 2.8 a). In Abb. 2.8 b wird ersichtlich, wie sich Raumwellen mit der gleichen Frequenz bei der Ausstrahlung unter verschiedenen Winkeln verhalten können: a) Reflexion an der E-Schicht, b) Reflexion nach kurzem Eindringen in die E-Schicht, c) und d) Weiterleitung in einem Kanal (Duct) in der E-Schicht.

2.1.4 Ultrakurze Wellen

Völlig anders verhalten sich die Ultrakurzwellen (UKW). Hier erfolgt direkte Ausbreitung (direkte Welle). Gelangen UKW-Signale zur Ionosphäre, werden sie von dieser kaum geschwächt, durchstoßen also diese Schicht und gelangen in den Welt Raum. Die Reichweite der ultrakurzen Wellen auf der Erde ist ungefähr so groß wie die ungehinderte Sichtweite bzw. die Reichweite der Lichtstrahlen (Abb. 2.9 a). Je höher die Sendeantennen (Abb. 2.9 b) und die Empfangsantennen (Abb. 2.9 e) sind, um so größer wird daher die Reichweite. Die theoretische Reichweite der direkten Welle lässt sich mit folgender Formel überschlägig berechnen:

Reichweite in km = $3,6 \cdot \sqrt{\text{Sendeantennenhöhe in m} + \text{Wurzel aus Empfangsantennenhöhe in m}}$

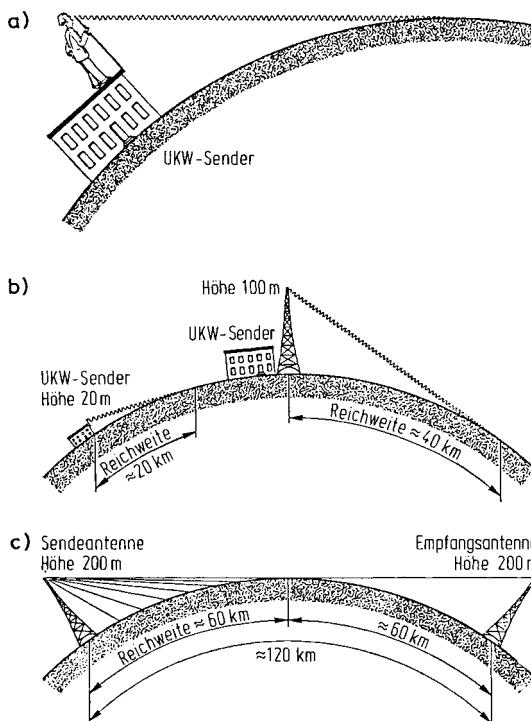


Abb. 2.9: Ausbreitung der Ultrakurzwellen (UKW)

- Sichtweite
- Reichweite abhängig von der Antennenhöhe
- Reichweite bei hoher Sende- und Empfangsantenne

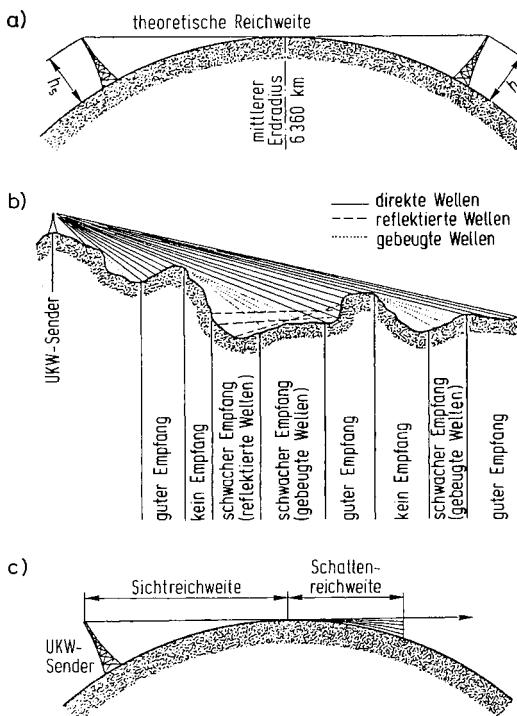


Abb. 2.10: Reichweite der Ultrakurzwellen (UKW)
 a) Berechnung der Reichweite
 b) Arten von Ultrakurzwellen
 c) Schattenreichweite

Die Höhen der Sendeantenne bzw. die Höhe der Empfangsantenne wird über dem Meeresspiegel eingesetzt (Abb. 2.10 a).

Ultrakurze Wellen zeigen in stärkerem Maße Beugungerscheinungen als Lichtwellen, d. h., ihre „Schatten“ hinter Hindernissen sind weniger scharf. Die Wellen biegen sich in gewissem Grade z. B. um einen Gebirgskamm herum, sodass die Talbewohner in günstigen Fällen noch etwas von der Strahlung abbekommen (Abb. 2.10 b). Außerdem tritt an der Grenze der Sichtweite auch an der ebenen Erdoberfläche eine Beugung der Wellen ein, durch welche die Reichweite um die sogenannte Schattenreichweite vergrößert wird (Abb. 2.10 c).

2.2 Kabel und Glasfaserleitungen

Wie bereits in der Einleitung dieses Kapitels erwähnt, sind das Doppeladerkabel, das Koaxialkabel und das Glasfaserkabel die wichtigsten Übertragungsleitungen in der Übertragung der Nachrichten.

Dietmar Benda

Elektronik ohne Ballast

Im ersten Teil des Buchs erfährt der Leser, dass ein tieferer Einstieg in die Elektronik bereits mit wenigen physikalischen Grundkenntnissen möglich ist. An zahlreichen praktischen Beispielen und Vergleichen wird aufgezeigt, dass die Beherrschung dieser Grundregeln das Pauken von „Faustformeln“ und „Eselsbrücken“ überflüssig macht. Eine theoretische, aber praktisch orientierte Minimalausrüstung ist also der Schlüssel für fundiertes Basiswissen. Die Vielzahl der vorgestellten Schaltungen basiert im Wesentlichen auf einigen Rundbauelementen, z. B. Widerständen, Kondensatoren, Dioden und Transistoren. Das Buch zeigt dem Leser die wichtigsten Kennwerte, Leistungs- und Funktionsmerkmale und erklärt anhand praktischer Beispiele die Einsatzmöglichkeiten.

Da es für viele Leser in der Elektronik immer schwieriger wird, aus der vielfältigen Literatur die wesentlichen elektronischen Grundschaltungen herauszufinden und sich als Basiswissen anzueignen, liegt im zweiten Teil dieses Werks der Schwerpunkt auf der Darstellung und der Funktionserklärung repräsentativer Schaltungen. Die einzelnen Funktionen werden dazu unter dem Gesichtspunkt der praxis- und berufstypischen Situation beschrieben und ausgewertet. Wenn es für das Verständnis erforderlich erschien, wurden die Schaltungen auf vereinfachte Funktionsmodelle zurückgeführt.

Der dritte Teil befasst sich mit wichtigen speziellen Ausprägungen der Elektronik. Die fortschreitende Automatisierung durch die Mikroelektronik etwa verlangt auch im elektrischen Energiebereich Schaltungen zur schnelleren und verlustärmeren Umwandlung bzw. Steuerung elektrischer Energie. Dieses Thema soll dem Anwender beispielhaft aufzeigen, auf welche Weise er die am besten geeigneten Schaltungen am zweckmäßigsten in der Energieelektronik einsetzen kann. Daher werden u. a. die gängigsten Bauelemente sowie die Geräte und Anlagen zur Energieversorgung und Antriebstechnik beschrieben. Beschreibungen praktisch angewandter und aktueller Schaltungen aus den wichtigsten Anwendungsbereichen, z. B. aus der Fotovoltaik, runden das Thema ab.

Aus dem Inhalt:

- Grundlagen der Elektronik
- Bauelemente
- Messen an Bauelementen und Schaltungen
- Analoge und digitale Schaltungstechnik
- Mikroprozessor/Computer
- Leistungselektronik
- Nachrichtentechnik
- Fehlersuche in Schaltungen



ISBN 978-3-7723-5380-2



9 783772 353802

Euro 49,95 [D]

Besuchen Sie uns im Internet www.franzis.de