

HANSER



Leseprobe

Dirk W. Hoffmann

Grundlagen der Technischen Informatik

ISBN (Buch): 978-3-446-44867-4

ISBN (E-Book): 978-3-446-44903-9

Weitere Informationen oder Bestellungen unter

<http://www.hanser-fachbuch.de/978-3-446-44867-4>

sowie im Buchhandel.



Vorwort

Die Computertechnik hat in wenigen Jahrzehnten eine Entwicklung vollzogen, die in ihrer Geschwindigkeit und Intensität einzigartig ist. Setzen sich die ersten Computer noch aus vergleichsweise wenigen Schaltkreisen zusammen, so verrichten in jedem modernen Arbeitsplatzrechner, Tablet-PC oder Smartphone Abermillionen von Transistoren ihren Dienst und führen in jeder Sekunde Milliarden von Berechnungen aus. Doch so rasant die Entwicklung der letzten Jahrzehnte auch war: Vergleichen wir die Maschinen der Pionierzeit mit unseren modernen Rechenboliden, so lassen sich eine Reihe von Grundprinzipien identifizieren, die sich im Laufe der Zeit zwar weiterentwickelt, aber im Kern nicht verändert haben. Diese Grundprinzipien, zusammen mit ihren modernen Ausprägungen, formen das Gebiet der technischen Informatik und sind Gegenstand des vorliegenden Buchs.

Geschrieben habe ich das Buch für Bachelor-Studenten der Fachrichtungen Informatik, Elektrotechnik, Informationstechnik und verwandter Studiengänge. Inhaltlich habe ich mich dabei an den typischen Lehrinhalten orientiert, die im Grundstudium an Hochschulen und Universitäten vermittelt werden. Neben dem Grundlagenwissen aus den Gebieten der Halbleitertechnik, der Zahlendarstellung und der booleschen Algebra werden die Entwurfsprinzipien kombinatorischer und sequenzieller Hardware-Komponenten bis hin zur Beschreibung moderner Prozessor- und Speicherarchitekturen vermittelt. Damit spannt das Buch den Bogen von den mathematischen Grundlagen digitaler Schaltelemente bis hin zu den ausgefeilten Hardware-Optimierungen moderner Hochleistungscomputer.

Es ist mir ein besonderes Anliegen, den Stoff anwendungsorientiert und didaktisch ansprechend zu vermitteln. Damit das Buch sowohl vorlesungsbegleitend als auch zum Selbststudium eingesetzt werden kann, werden die Lehrinhalte aller Kapitel durch zahlreiche Übungsaufgaben komplementiert. Des Weiteren habe ich zahlreiche Anwendungsbezüge mit aufgenommen, um eine enge Verzahnung zwischen Theorie und Praxis zu erreichen.

Seit dem Erscheinen der letzten Auflage habe ich wieder zahlreiche Zuschriften erhalten, über die ich mich sehr gefreut habe. Namentlich bedanken möchte ich mich bei Herrn Sven Badke, Frau Ines Machinek und Herrn Prof. Dr. Martin Rumpler, die mich auf mehrere bisher unentdeckte Fehler aufmerksam gemacht haben. Inzwischen erscheinen die *Grundlagen der technischen Informatik* in der fünften Auflage, und ich bin weiterhin jedem aufmerksamen Leser für Hinweise zu Verbesserungsmöglichkeiten oder Fehlern dankbar.

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	11
1.1	Was ist technische Informatik?	11
1.2	Vom Abakus zum Supercomputer	13
1.3	Wohin geht die Reise?	30
2	Halbleitertechnik	33
2.1	Halbleiter	34
2.1.1	Atommodell von Bohr	34
2.1.2	Reine Halbleiter	37
2.1.3	Dotierte Halbleiter	39
2.2	Integrierte Schaltelemente	41
2.2.1	Halbleiterdioden	41
2.2.2	Bipolartransistoren	42
2.2.3	Feldeffekttransistoren	46
2.3	Chip-Fertigung	51
2.3.1	Produktion integrierter Schaltkreise	51
2.3.2	Integrationsdichte	57
2.4	Übungsaufgaben	58
3	Zahlendarstellung und Codes	59
3.1	Zahlensysteme	60
3.2	Rechnerinterne Zahlenformate	67
3.2.1	Darstellung natürlicher Zahlen	67
3.2.2	Darstellung rationaler Zahlen	73
3.3	Zahlencodes	80
3.3.1	Tetraden-Codes	80
3.3.2	Fehlererkennende Codes	84
3.4	Übungsaufgaben	86
4	Boolesche Algebra	89
4.1	Axiomatisierung nach Huntington	90
4.1.1	Mengenalgebra	91
4.1.2	Schaltalgebra	93
4.2	Boolesche Ausdrücke und Aussagen	95
4.2.1	Abgeleitete Operatoren	97
4.2.2	Erfüllbarkeit und Äquivalenz	100
4.2.3	Strukturelle Induktion	102
4.2.4	Dualitätsprinzip	105

4.3	Rechnen in booleschen Algebren	109
4.3.1	Abgeleitete Umformungsregeln	109
4.3.2	Vereinfachung boolescher Ausdrücke	111
4.3.3	Vollständige Operatorensysteme	117
4.4	Normalformdarstellungen	119
4.4.1	Konjunktive und disjunktive Normalform	119
4.4.2	Reed-Muller-Normalform	122
4.4.3	Binäre Entscheidungsdiagramme	125
4.5	Übungsaufgaben	133
5	Schaltnetze	139
5.1	Grundlagen der Digitaltechnik	140
5.1.1	Schaltkreisfamilien	140
5.1.2	MOS-Schaltungstechnik	145
5.1.3	Lastfaktoren	155
5.2	Schaltungssynthese	156
5.2.1	Zweistufige Schaltungssynthese	157
5.2.2	BDD-basierte Schaltungssynthese	158
5.2.3	FDD-basierte Schaltungssynthese	159
5.3	Formelsynthese	161
5.3.1	Funktionale Formelsynthese	161
5.3.2	Relationale Formelsynthese	163
5.3.3	Definitorische Formelsynthese	164
5.4	Komplexitätsanalyse	167
5.5	Zeitverhalten digitaler Schaltungen	169
5.5.1	Signalausbreitung und -verzögerung	169
5.5.2	Störimpulse	171
5.6	Übungsaufgaben	175
6	Minimierung	181
6.1	Minimierungsziele	182
6.2	Karnaugh-Veitch-Diagramme	186
6.2.1	Minimierung partiell definierter Funktionen	190
6.2.2	Konstruktion Hazard-freier Schaltungen	194
6.2.3	Minimierung mehrstelliger Funktionen	196
6.3	Quine-McCluskey-Verfahren	197
6.4	Übungsaufgaben	201
7	Standardschaltnetze	205
7.1	Motivation	206
7.2	Multiplexer und Demultiplexer	206
7.3	Komparatoren	213
7.4	Präfix-Logik	215

7.5	Addierer	218
7.5.1	Halb- und Volladdierer	218
7.5.2	Carry-ripple-Addierer	220
7.5.3	Carry-look-ahead-Addierer	221
7.5.4	Conditional-Sum-Addierer	224
7.5.5	Präfix-Addierer	227
7.5.6	Carry-save-Addierer	229
7.6	Inkrementierer	232
7.7	Subtrahierer	233
7.8	Multiplizierer	234
7.8.1	Matrixmultiplizierer	235
7.8.2	Carry-save-Multiplizierer	238
7.8.3	Wallace-Tree-Multiplizierer	241
7.8.4	Dadda-Tree-Multiplizierer	246
7.9	Barrel-Shifter	249
7.10	Arithmetisch-logische Einheit	251
7.11	Programmierbare Logikbausteine	253
7.12	Übungsaufgaben	256
8	Schaltwerke	265
8.1	Digitale Speicherelemente	266
8.1.1	Asynchrone Speicherelemente	267
8.1.2	Taktzustandsgesteuerte Speicherelemente	271
8.1.3	Taktflankengesteuerte Speicherelemente	274
8.1.4	Bevorrechtigte Eingänge	281
8.1.5	CMOS-Implementierung	282
8.2	Vom Flipflop zum Schaltwerk	285
8.2.1	Endliche Automaten	286
8.2.2	Schaltwerksynthese	289
8.3	Übungsaufgaben	293
9	Standardschaltwerke	299
9.1	Register	300
9.1.1	Auffangregister	300
9.1.2	Schieberegister	302
9.1.3	Universalregister	304
9.1.4	Akkumulatoren	305
9.2	Zähler	308
9.2.1	Synchrone Binärzähler	309
9.2.2	Asynchrone Binärzähler	313
9.2.3	Mischzähler	314
9.2.4	Instruktionszähler	316

9.3	Hauptspeicher	318
9.3.1	SRAM-Speicher	318
9.3.2	DRAM-Speicher	320
9.3.3	Fehlererkennung und -korrektur	327
9.4	Übungsaufgaben	330
10	Register-Transfer-Entwurf	335
10.1	Entwurf komplexer Systeme	336
10.1.1	Operationswerksynthese	338
10.1.2	Steuerwerksynthese	340
10.2	Mikroprogrammierung	343
10.3	Übungsaufgaben	349
11	Mikroprozessortechnik	351
11.1	Elemente eines Mikrorechners	352
11.1.1	Von-Neumann-Architektur	352
11.1.2	Aufbau der CPU	356
11.2	Ein einfacher Modellprozessor	360
11.3	Übungsaufgaben	374
12	Rechnerstrukturen	377
12.1	Rechnerklassifikation nach Flynn	378
12.2	Instruktionsarchitekturen	379
12.2.1	CISC-Prozessoren	380
12.2.2	RISC-Prozessoren	384
12.3	Methoden zur Leistungssteigerung	388
12.3.1	Pipelining	388
12.3.2	Cache-Speicher	393
12.4	Leistungsbewertung	399
12.4.1	Maßzahlen zur Leistungsbewertung	399
12.4.2	Benchmarks	402
12.5	Übungsaufgaben	405
A	Notationsverzeichnis	411
B	Abkürzungsverzeichnis	413
C	Glossar	415
	Literaturverzeichnis	433
	Namensverzeichnis	437
	Sachwortverzeichnis	439

2 Halbleitertechnik

In diesem Kapitel werden Sie . . .

- die elektrischen Eigenschaften von Halbleiterkristallen verstehen,
- mit der Diode und dem Transistor zwei grundlegende Halbleiterelemente kennen lernen,
- die Produktion integrierter Schaltkreise nachvollziehen.



Der dänische Physiker Niels Henrik David Bohr wurde 1885 in Kopenhagen geboren und zählt zu den bedeutendsten Physikern des zwanzigsten Jahrhunderts. Im Jahre 1922 wurde Bohr für seine Verdienste um die Erforschung der Struktur der Atome und der von ihnen ausgehenden Strahlung mit dem Nobelpreis ausgezeichnet. Zu seinen wichtigsten Hinterlassenschaften gehört zweifelsfrei das Bohr'sche Atommodell, das neue Erkenntnisse in den inneren Aufbau von Atomen gewährte und zugleich als Wegbereiter für die sich später entwickelnde Quantenmechanik angesehen wird.

Das Modell von Bohr ist eine Weiterentwicklung des Rutherford'schen Modells, das Elektronen wie winzige, den Atomkern umkreisende Planeten interpretiert und damit im Widerspruch zur klassischen Elektrodynamik steht. Diese sagt aus, dass bewegende elektrische Ladungen einen Teil ihrer Energie als elektromagnetische Welle abstrahlen. Genau eine solche bewegliche Ladung stellt das Elektron dar. Aufgrund seiner Rotation um den Atomkern müsste dieses permanent an Energie verlieren und schließlich in den Atomkern stürzen.

Bohr postulierte in seinem Modell die Existenz von *Schalen*, auf denen sich die Elektronen mit unterschiedlichen Energieniveaus verlustfrei bewegen können. Mit Hilfe dieses Modells war es erstmals möglich, viele chemische Reaktionen auf erstaunlich einfache Weise physikalisch zu erklären.

Heute gilt das Bohr'sche Atommodell als veraltet, da es im Widerspruch zu den modernen Erkenntnissen der Quantenmechanik steht. Andere Modelle, wie z. B. das Orbitalmodell, nehmen gegenwärtig dessen Platz ein. Nichtsdestotrotz beschreibt das Bohr'sche Atommodell die Eigenschaften von Atomen und Elektronen so genau, dass sich damit unter anderem das elektrische Verhalten von Halbleiterkristallen präzise erklären lässt.

2.1 Halbleiter

Der historische Rückblick in Kapitel 1 hat aufgezeigt, dass die Entwicklung der Computertechnik eng mit den Fortschritten im Bereich der integrierten Schaltungstechnik verbunden ist. Ohne die beeindruckenden Erfolge im Bereich der Hochintegration in der zweiten Hälfte des vorherigen Jahrhunderts wäre die Konstruktion von elektronischen Geräten, wie wir sie heute kennen und fast schon als selbstverständlich erachten, niemals Realität geworden. Im Detail betrachtet, setzen sich moderne Mikrochips aus mehreren Millionen winziger Verknüpfungsglieder zusammen, die in einem komplizierten Fertigungsprozess dicht gepackt auf ein kleines Stück Silizium aufgebracht werden. Dass wir heute technisch in der Lage sind, mikroskopisch kleine Schaltelemente zu erzeugen, die zudem um viele Größenordnungen schneller schalten als die lange Zeit dominierende Röhrentriode, haben wir den chemischen und physikalischen Eigenschaften einer ganz bestimmten Stoffgruppe zu verdanken – den *Halbleitern*.

Halbleiter sind der Grundstoff mikroelektronischer Schaltungen und die daraus gefertigten Transistoren spielen in der Computertechnik die gleiche Rolle wie die Nukleotide in der Genetik. Aufgrund ihrer immensen Bedeutung wollen wir in diesem und den nächsten Abschnitten einen genaueren Blick auf die Grundbausteine wagen, aus denen sich sämtliche modernen Hardware-Schaltungen zusammensetzen. Insbesondere werden wir die Frage klären, was Halbleiterelemente so einzigartig macht und wie wir ihre besonderen Eigenschaften für die Konstruktion komplexer Mikrochips nutzen können.

Im nächsten Abschnitt werden wir zunächst einen kleinen, aber unabdingbaren Ausflug in die Chemie unternehmen und zunächst auf atomarer Ebene klären, wie sich Stromflüsse durch die Bewegung einzelner Elektronen im Detail erklären lassen. Auf den erworbenen Grundkenntnissen aufbauend werden wir in den Abschnitten 2.2.1 bis 2.2.3 mit der Halbleiterdiode und dem Transistor die zentralen Bausteine kennen lernen, die in einem komplexen Zusammenspiel das Verhalten von Mikrochips definieren, mit denen wir tagtäglich hundertfach in Berührung kommen.

2.1.1 Atommodell von Bohr

Nach dem Bohr'schen Atommodell setzt sich ein einzelnes Atom aus *Protonen*, *Neutronen* und *Elektronen* zusammen. Protonen tragen eine

positive, Elektronen eine negative Ladung. Beide weisen die exakt identische Ladungsmenge auf, so dass ein Proton durch jeweils ein Elektron kompensiert wird. Der dritte atomare Baustein – das Neutron – ist ladungsneutral und trägt ausschließlich zur Masse des Atoms bei. In allen chemischen Elementen ist die Beschaffenheit der drei Grundbausteine gleich. Einzig die zahlenmäßige Zusammensetzung von Protonen und Neutronen im Atomkern entscheidet, welches chemische Element wir letztendlich vor uns haben.

Im Normalzustand ist ein Atom nach außen ladungsneutral – es besitzt genauso viele Protonen wie Elektronen. Weicht die Zahl der Elektronen von der Zahl der Protonen ab, so sprechen wir von einem *Ion*. Ein Ion ist stets negativ oder positiv geladen, je nachdem, ob die Anzahl der Elektronen die Anzahl der Protonen übersteigt oder umgekehrt.

Abbildung 2.2 demonstriert den schematischen Aufbau eines Heliumatoms im Bohr'schen Atommodell. Während je zwei Protonen und Neutronen den *Atomkern* bilden, befinden sich die beiden Elektronen in der *Atomhülle*. Diese besteht aus mehreren Schalen, auf denen sich die Elektronen um den Kern bewegen. Beachten Sie, dass die Skizze in Abbildung 2.2 bei weitem nicht maßstabsgetreu gezeichnet ist. In Wirklichkeit ist der Radius der Atomhülle rund 10.000 mal größer als der des Kerns. Trotzdem trägt der Atomkern fast die komplette Masse eines Atoms. Obwohl Protonen und Neutronen eine unglaublich kleine Masse von $1\,6725 \times 10^{-24}$ g bzw. $1\,6748 \times 10^{-24}$ g besitzen, sind sie immer noch knapp 2000 mal schwerer als ein Elektron.

Ein wesentliches Merkmal des Bohr'schen Atommodells betrifft die Abstände, in denen einzelne Elektronen den Atomkern umkreisen können. Anders als z. B. im Rutherford'schen Modell sind diese nicht beliebig. Wie weiter oben angedeutet, wird der Atomkern durch mehrere Schalen eingehüllt, auf denen sich die verschiedenen Elektronen bewegen. Auf welcher Schale sich ein einzelnes Elektron befindet, wird einzig und alleine durch sein Energieniveau bestimmt. Elektronen auf den inneren Schalen besitzen ein niedrigeres, Elektronen auf den äußeren Schalen ein höheres Niveau. Das Energieniveau eines Elektrons ist keine kontinuierliche Größe und kann nur ganz bestimmte, diskrete Werte annehmen. Dies ist der Grund, warum sich ein Elektron immer nur auf einer bestimmten Schale, nie jedoch dazwischen befinden kann.

Zur besseren Unterscheidung wurden die verschiedenen Schalen im Bohr'schen Atommodell mit Buchstaben versehen. Die innerste wird als K-Schale, die zweite als L-Schale, die dritte als M-Schale usw. bezeichnet. Die verschiedenen Schalen eines Atoms unterscheiden sich in der Anzahl der Elektronen, die sich zur gleichen Zeit darauf befinden



Niels Bohr (1885 – 1962)
Albert Einstein (1879 – 1955)

Abbildung 2.1: Niels Bohr (links) im Zwiegespräch mit Albert Einstein im Jahre 1925.

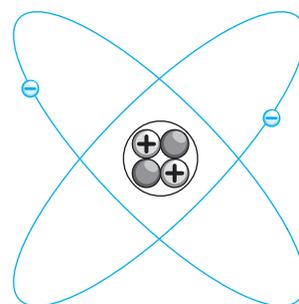


Abbildung 2.2: Das Heliumatom. Im Kern befinden sich je zwei Protonen und Neutronen, die im Bohr'schen Atommodell von zwei Elektronen umkreist werden.

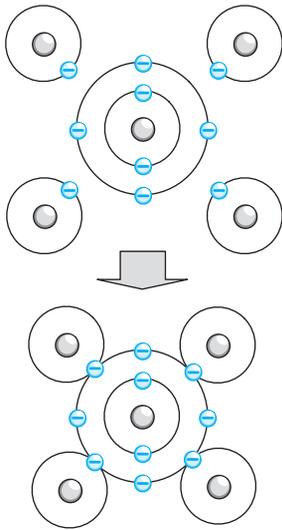


Abbildung 2.3: Vier Wasserstoffatome und ein Kohlenstoffatom im Bohr'schen Atommodell. Über die freien Valenzelektronen vereinigen sich die Atome zu einem stabilen Methanmolekül (CH_4).

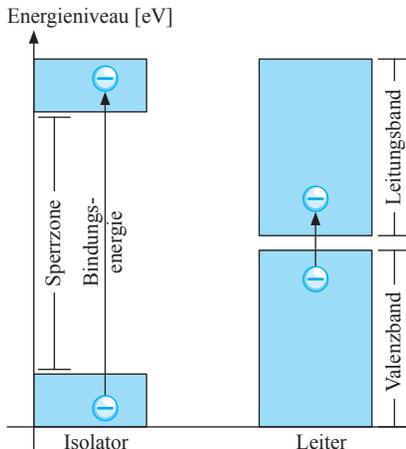


Abbildung 2.4: Bändermodell. Die verschiedenen Energieniveaus von Leitungs- und Valenzelektronen führen zu einer natürlichen Zweiteilung auf der y-Achse.

können. So kann die K-Schale nur 2, die L-Schale und die M-Schale dagegen 8 Elektronen aufnehmen.

Abbildung 2.3 demonstriert die Elektronenanordnung am Beispiel von Kohlenstoff- und Wasserstoffatomen. In beiden ist die äußere Schale nicht vollständig besetzt. Die Elektronen auf der ungesättigten Schale werden *Valenzelektronen* genannt und bestimmen maßgeblich, wie sich ein Atom im Zuge einer chemischen Reaktion verhält. Atome sind stets bestrebt, den energetisch ärmsten Zustand anzunehmen und werden demnach versuchen, ihre äußeren Schalen zu vervollständigen. Im Falle von Kohlenstoff und Wasserstoff führt dies dazu, dass jeweils vier Wasserstoffatome ihr freies Valenzelektron mit einem Kohlenstoffatom teilen und diesem dadurch zu einer gesättigten Schale verhelfen. Als Ergebnis entsteht ein Methan-Molekül (Erdgas, CH_4). Wie bei allen anderen chemischen Reaktionen auch, bleiben die inneren Atomshalen durch diese Vorgänge gänzlich unberührt.

Weiter oben haben wir herausgearbeitet, dass einzig und allein das Energieniveau bestimmt, auf welcher Schale sich ein Elektron befindet. Im Umkehrschluss bedeutet dieses Ergebnis, dass ein Elektron durch die Aufnahme oder die Abgabe von Energie zwischen den Schalen hin- und herwechseln kann. Auf atomarer Ebene finden diese Vorgänge in der Tat fortwährend statt. Elektronen, die z. B. aufgrund thermischer Erhitzung Energie aufnehmen, bewegen sich in Richtung der äußeren Schalen. Wird ein gewisses Energieniveau überschritten, so verliert das Elektron gänzlich seine Bindung und kann sich frei im Atomverbund bewegen. Aus dem ehemaligen Valenzelektron ist jetzt ein freies *Leitungselektron* geworden.

Um ein Elektron aus dem Atom zu lösen, muss die sogenannte *Bindungsenergie* aufgebracht werden. Diese unterscheidet sich erheblich zwischen den verschiedenen chemischen Substanzen. In klassischen Isolatoren wie z. B. Hartgummi, ist die aufzubringende Energiemenge so groß, dass selbst bei hohen Temperaturen nur wenige Elektronen diesen Sprung schaffen. Kurzum: Ein Stromfluss kommt so gut wie nicht zustande. In elektrischen Leitern wie z. B. Kupfer oder Silber, reicht hingegen eine sehr geringe Energiemenge aus, um freie Leitungselektronen zu erzeugen.

Besonders deutlich wird der Unterschied zwischen Isolatoren und Leitern im *Bändermodell*. Tragen wir die möglichen Energieniveaus eines Elektrons, wie in Abbildung 2.4 gezeigt, auf der y-Achse eines Diagramms auf, so lässt die Unterscheidung in Leitungs- und Valenzelektronen eine natürliche Zweiteilung entstehen. Elektronen hohen Energieniveaus befinden sich im *Leitungsband*, während sich Elektronen nied-

rigen Niveaus im *Valenzband* befinden. Je mehr Bindungsenergie für die Freisetzung eines Elektrons aufgebracht werden muss, desto weiter klaffen das Leitungs- und das Valenzband auseinander. Zwischen beiden Bändern entsteht eine Sperrzone, die keine einnehmbaren Energieniveaus enthält und mit zunehmender Größe von immer weniger Elektronen überwunden werden kann. Wie zu erwarten, zeichnen sich gute Isolatoren durch eine große Sperrzone aus, während das Leitungs- und das Valenzband in guten Leitern fast nahtlos ineinander übergehen.

2.1.2 Reine Halbleiter

Halbleiter sind spezielle Festkörper, die gleichsam als Isolator wie auch als elektrischer Leiter auftreten können. Ihre spezielle Eigenschaft haben diese Stoffe der Energiemenge zu verdanken, die zur Freisetzung eines Valenzelektrons aufgebracht werden muss. Die Bindungsenergie liegt in einem Bereich, der groß genug ist, um das Material bei geringen Temperaturen zu einem Isolator werden zu lassen, gleichzeitig aber klein genug ist, um bei mäßigen Temperaturen von einer größeren Anzahl von Elektronen überwunden zu werden. So reicht z. B. für den Halbleiter Germanium eine Temperatur von ca. 50° C aus, um eine gute elektrische Leitfähigkeit zu erreichen.

Abbildung 2.5 zeigt die Einordnung von Halbleitern in das Bändermodell. Die eingezeichnete Sperrzone befindet sich zwischen derer von Isolatoren und jener von elektrischen Leitern. Eine exakte Einteilung von Materialien in Leiter, Halbleiter und Isolatoren ist über deren *spezifischen Widerstand* ρ möglich (vgl. Tabelle 2.1). Materialien mit einem Wert kleiner als $10^{-6} \Omega\text{m}$ bzw. größer als $10^{10} \Omega\text{m}$ gelten als Leiter bzw. als Isolator. Halbleiter besitzen einen spezifischen Widerstand, der zwischen diesen beiden Werten liegt.

Für den Bau elektronischer Schaltungen spielen insbesondere die Halbleiterelemente Silizium (*Si*) und Germanium (*Ge*) eine Rolle. Beide Elemente sind so beschaffen, dass ihre Leitfähigkeit durch äußere Einflüsse vergleichsweise einfach beeinflusst werden kann. Silizium steht an Position 14 des Periodensystems und ist nach dem Sauerstoff das zweithäufigste Element in der Erdkruste. Die 14 Elektronen eines Siliziumatoms verteilen sich auf insgesamt 3 Schalen. Die innerste ist mit 2 und die zweite mit 8 Elektronen vollständig gefüllt. Die M-Schale ist mit 4 Valenzelektronen dagegen ungesättigt.

Im Verbund ordnen sich die Siliziumatome, wie in Abbildung 2.6 skizziert, in Form eines *Kristallgitters* an. Um jedes Atom gruppieren sich 4

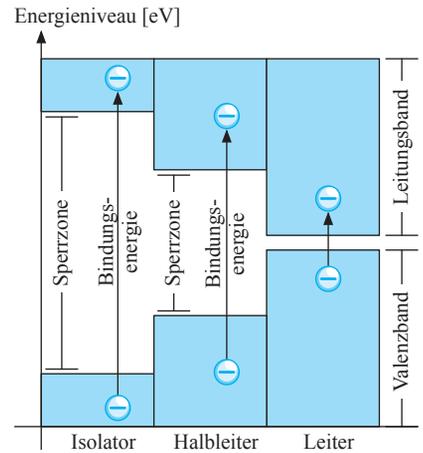


Abbildung 2.5: Einordnung von Halbleitern im Bändermodell

Isolatoren	
Material	Widerstand
Hartgummi	$10^{16} \Omega\text{m}$
Bernstein	$10^{14} \Omega\text{m}$
Halbleiter	
Material	Widerstand
Silizium (rein)	$10^2 \Omega\text{m}$
Germanium (rein)	$10^0 \Omega\text{m}$
Germanium (dotiert)	$10^{-4} \Omega\text{m}$
Leiter	
Material	Widerstand
Platin	$10^{-7} \Omega\text{m}$
Silber	$10^{-8} \Omega\text{m}$

Tabelle 2.1: Über den spezifischen Widerstand lassen sich Materialien in Isolatoren, Halbleiter und Leiter klassifizieren.

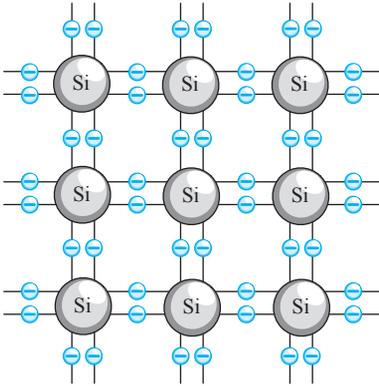


Abbildung 2.6: Struktur des Siliziumkristalls. Jedes Atom ist von 4 weiteren Atomen umgeben, die über jeweils zwei gemeinsam genutzte Valenzelektronen eine stabile Verbindung herstellen.

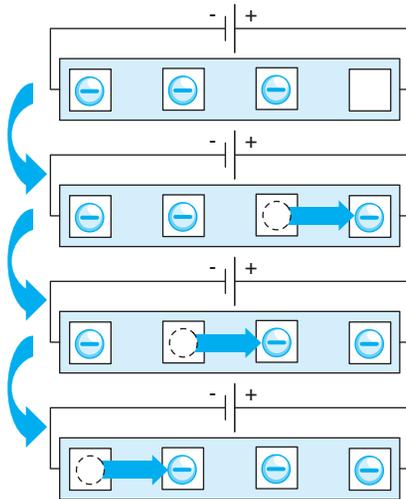


Abbildung 2.7: Eigenleitung im Halbleiterkristall. Die freigesetzten Leitungselektronen richten sich im elektrischen Feld aus und wandern in Richtung der positiven Spannungsquelle. Die gleichzeitig entstehenden Elektronenlöcher bewegen sich in entgegengesetzter Richtung auf den Minuspol zu.

weitere, die über je 2 gemeinsam genutzte Valenzelektronen eine feste Bindung eingehen und die M-Schalen jedes Siliziumatoms damit auf effektiv 8 Elektronen auffüllen. Aufgrund der regulären Struktur der Atomanordnung sprechen wir in diesem Zusammenhang auch von einem *Einkristall* (*single crystal*). Anders als in der schematischen Zeichnung suggeriert, ordnen sich die einzelnen Atome in der Realität dreidimensional an. Bei der skizzierten Struktur handelt es sich um ein vereinfachtes zweidimensionales Modell, das für unsere Anschauungszwecke jedoch völlig ausreichend ist.

Die Struktur des Siliziumkristalls entspricht jener des Diamanten. Beide Materialien unterscheiden sich jedoch erheblich in der Bindungsenergie, die zum Heraustrennen eines Elektrons benötigt wird. Um ein Elektron des Siliziumkristalls in das Leitungsband zu heben, ist eine Energie von ca. 1,1 eV ausreichend. In der wesentlich stabileren Diamantstruktur muss mit 6 eV bereits mehr als die fünffache Energie aufgebracht werden, um ein Elektron von einem einzelnen Kohlenstoffatom zu trennen. Diese hohe Energiemenge macht den Diamant zu einem exzellenten Isolator – wenn auch zu einem sehr kostspieligen.

Durch die *Brown'sche Molekularbewegung* besitzt jedes Elektron eine gewisse Schwingungsenergie, die bei Raumtemperatur im Bereich von 0,025 eV liegt. Der exakte Wert variiert zwischen den einzelnen Atomen, so dass es dem ein oder anderen Elektron immer wieder gelingt, die Bindungsenergie zu überwinden und in das Leitungsband zu gelangen. Steigt oder sinkt die Temperatur, so nimmt mit der thermischen Energie auch die Elektronendichte im Leitungsband kontinuierlich zu bzw. ab. In einem Siliziumkristall befinden sich bei 50° C bereits 10^{10} freie Elektronen pro cm^3 im Leitungsband. Verglichen mit den klassischen elektrischen Leitern ist diese Elektronendichte trotzdem gering. Hier kommt im Durchschnitt auf jedes der ca. 10^{22} Atome pro cm^3 ein freies Leitungselektron.

Die Freisetzung von Elektronen ist der Schlüssel für die elektrische Leitfähigkeit des Halbleiterkristalls. Für jedes herausgetrennte Elektron entsteht eine *Bindungslücke*, die auch als *Elektronenloch* oder als *Defektelektron* bezeichnet wird. Die gleichzeitige Entstehung von Leitungselektronen und Löchern wird mit dem Begriff der *Paarbildung* umschrieben. Diese hat einen entscheidenden Einfluss auf die Ladungsverteilung innerhalb des Kristalls. Wechselt ein Elektron in das Leitungsband, so hinterlässt es ein positiv geladenes Ion, das seinerseits anziehend auf die umliegenden Elektronen wirkt. Entsprechend häufig wird das entstandene Loch entweder durch ein freies Leitungselektron oder durch ein benachbart freigesetztes Elektron aufgefüllt. Wir sprechen in diesem Fall von einer *Rekombination*.

Legen wir an den Halbleiterkristall ein elektrisches Feld an, so findet ein gerichteter Stromfluss statt. Wie in Abbildung 2.7 gezeigt, werden die freigesetzten Elektronen durch das elektrische Feld in Richtung des Pluspols getrieben. Da wir die Elektronenlöcher ohne Probleme als positive Ladungsträger interpretieren können, erzeugen diese einen *Löcherstrom*, der dem *Elektronenstrom* entgegengesetzt ist. Obwohl die positiv geladenen Ionen in Wirklichkeit fest in das Kristallgitter integriert sind und sich selbst nicht von der Stelle bewegen, ist es für die Anschauung vollkommen korrekt, sich den Löcherstrom als einen Fluss positiv geladener Ladungsträger vorzustellen (vgl. Abbildung 2.8).

Die Fähigkeit eines Halbleiters, über die Bildung freier Elektronen und Defektelektronen einen Stromfluss zu erzeugen, wird als *Eigenleitung* bezeichnet. Wie oben angedeutet, nimmt die Paarbildung mit zunehmender thermischer Energie stark zu, so dass Halbleiter mit wachsender Temperatur zu einem immer besseren Leiter werden. Von den klassischen elektrischen Leitern kennen wir diese Eigenschaft nicht. Hier stehen sich die Leitungselektronen bei zunehmender Molekularbewegung gegenseitig wie Hindernisse im Weg und sorgen dafür, dass die Leitfähigkeit mit zunehmenden Temperaturen kontinuierlich sinkt.

2.1.3 Dotierte Halbleiter

In einem reinen Siliziumkristall kommen Elektronen und Defektelektronen in gleicher Anzahl vor. Wird dieses Gleichgewicht durch eine gezielte Verunreinigung des Trägermaterials gestört, so lässt sich die elektrische Leitfähigkeit des Kristalls erheblich verbessern. Der Vorgang der Verunreinigung wird als *Dotierung* und die entstehende Kristallstruktur als *dotierter Halbleiter* bezeichnet.

Als erstes dotiertes Halbleitermaterial betrachten wir den *Elektronenüberschussleiter*. Dieser entsteht, indem Fremdatome in das Kristallgitter eingebaut werden, die über ein zusätzliches Valenzelektron verfügen. Wie ein solches Gitter aussehen kann, demonstriert Abbildung 2.9 am Beispiel eines mit Phosphor verunreinigten Siliziumkristalls. Das Phosphoratom besitzt 5 Valenzelektronen in der M-Schale und damit eines mehr als das Siliziumatom (vgl. Abbildung 2.10). Von den 5 Valenzelektronen werden nur 4 für den Einbau in das Kristallgitter benötigt. Das überschüssige fünfte Elektron ist nur schwach eingebunden. Geringe Energiemengen reichen aus, um es zu lösen und zu einem freien Ladungsträger werden zu lassen.

Aufgrund ihrer elektronenspendenden Funktion werden die künstlich eingebauten Phosphoratomene als *Donatoren* bezeichnet. Da in einem sol-

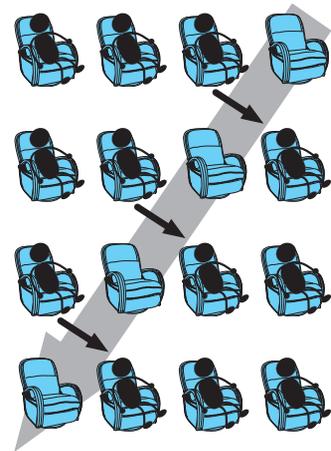


Abbildung 2.8: Eigenleitung einmal anders. Die Bewegung der Ladungsträger lässt sich bildlich mit dem Auffüllen einer Kinoreihe vergleichen. Während die Besucher (Elektronen) von links nach rechts durch die Reihe rücken, scheinen die freien Sitze (Elektronenlöcher) trotz ihrer stationären Montage von rechts nach links zu wandern.

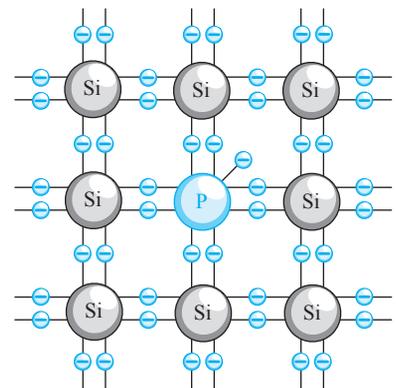


Abbildung 2.9: Struktur eines Elektronenüberschussleiters (n-Leiter). Durch den gezielten Einbau von Phosphoratomene werden zusätzliche Valenzelektronen in das Siliziumgitter eingebracht. Diese können sich nahezu ungehindert durch die Kristallstruktur bewegen.

IA	IIA	IIIB	IVB	VB	VIB	VIIIB	VIIIIB			IB	IIB	IIIA	IVA	VA	VIA	VIIA	VIIIA
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1 H																	2 He
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
55 Cs	56 Ba		72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
87 Fr	88 Ra		104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Uub						
			57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
			89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr

Abbildung 2.10: Das Periodensystem. Die Elemente der dritten, vierten und fünften Hauptgruppe spielen für die Halbleitertechnik eine zentrale Rolle. Um die gewünschte elektrische Leitfähigkeit zu erreichen, werden die Trägersubstanzen Silizium (*Si*) bzw. Germanium (*Ge*) mit Elementen der dritten bzw. der fünften Hauptgruppe gezielt verunreinigt (dotiert). Die Dotierung mit Bor (*B*), Indium (*In*), Aluminium (*Al*) oder Gallium (*Ga*) lässt ein p-Gebiet entstehen, während die Verunreinigung mit Phosphor (*P*), Arsen (*As*), Antimon (*Sb*) oder Bismut (*Bi*) ein n-Gebiet erzeugt.

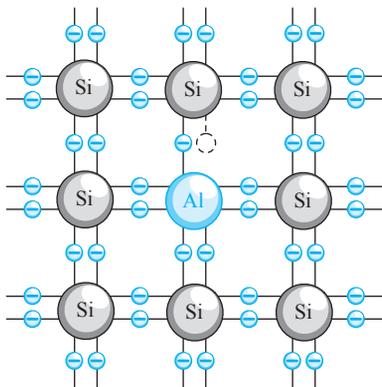


Abbildung 2.11: Struktur eines Elektronenmangelleiters (p-Leiter). Durch den gezielten Einbau von Aluminiumatomen entstehen künstliche Elektronenlöcher, die wie positive Ladungsträger wirken.

chen Halbleiterkristall mehr Elektronen als Elektronenlöcher vorhanden sind, spielen erstere die Rolle des *Majoritätsträgers* und letztere die des *Minoritätsträgers*. Aufgrund des negativen Vorzeichen des Majoritätsträgers sprechen wir im Falle eines Elektronenüberschussleiters auch von einem *n-Leiter*.

Wird der Siliziumträger nicht mit Elementen aus der fünften, sondern mit Elementen aus der dritten Hauptgruppe des Periodensystems dotiert, so entsteht ein *Elektronenmangelleiter*. Die in Frage kommenden Elemente Bor, Indium, Aluminium oder Gallium besitzen mit 3 Valenzelektronen in der M-Schale ein Elektron weniger als der Silizium- oder der Germaniumträger. Wie in Abbildung 2.11 demonstriert, erzeugt der Einbau der Fremdatome künstliche Löcher innerhalb des Kristallgitters. Diese können Elektronen an sich ziehen und werden aufgrund dieser Eigenschaft als *Akzeptoren* bezeichnet. Anders als im Falle des n-Leiters spielen jetzt nicht mehr die Elektronen, sondern die Elektronenlöcher dank ihrer zahlenmäßigen Überlegenheit die Rolle des Majoritätsträgers. Gemäß ihrer positiven Ladung sprechen wir jetzt von einem *p-Leiter*.

Sachwortverzeichnis

Symbole

2-Bit-Prädiktion, 393
2-aus-5-Code, 84
2421-Code, 83
7-Segment-Anzeige, 80, 135
74210-Code, 84, 85
8421-Code, 81

A

Abakus, 13, 415
Abgeleiteter Operator, 97
Abhängige Variable, 94
Absolute Adressierung, 381
Absoluter Sprung, 317
Absorptionsgesetz, 109
Addierer, 218, 415
 Carry-look-ahead-, **221**, 263
 Carry-ripple-, **220**, 263
 Carry-save-, 229
 Conditional-Sum-, 224
 Präfix-, 227
 serieller, 333
Additionssystem, 60, 415
Adressbus, 356, 360, 415
Adressdecoder, 320
Adresse, 254
Adressierung
 absolute, 381
 indirekte, 381
 postinkrementierende, 386
 relative, 381
 speicherindirekte, 382
Adressierungsart, 381, 415
Adressierungsgranularität, 318
Adressmodifikator, 347
Adressmultiplexing, 323
Adresspin, 323
Äquivalenz, 100
 Äquivalenz-Operation, 99
Aiken-Code, 81, 83
Akkumulator, 305, 337, 415
Akzeptor, 40, 286, 415
Algorithmus
 Euklidischer, 375
Allgemeingültigkeit, 100
Allzweckregister, 415
Alphabet
 Ausgabe-, 286
 Eingabe-, 286
Alpha-Teilchen, 328, 334
Analytische Maschine, 16
Anstiegszeit, 170
Antivalenz-Operation, 99
Antivalenzfunktion, **125**, 157, 215
Arabisches System, 61
Architektur
 Big-Endian-, 68
 EM64T-, 380
 Harvard-, 20, **353**, 361
 IA-32-, 380
 IA-64-, 380
 Little-Endian-, 68
 Load-Store-, 385
 PowerPC-, 386
 Von-Neumann-, 352
 x86-, 379
Arithmetisch-logische Einheit, 251, 415
ASCC, 19
Assembler, 353, 415
Assembler-Sprache, 416
Assoziativer Cache, 396
Assoziativgesetz, 110
Asynchroner Zähler, 313, 330
Asynchrones RS-Latch, 267
Atom, 34
Auffangregister, 300, 416
Auflösungsgenauigkeit, 75, 77
Aufzugssteuerung, 343, 350

Ausdruck
 äquivalenter, 100
 allgemeingültiger, 100
 boolescher, 96
 erfüllbarer, 100
 tautologischer, 100
Ausführungsphase, 359
Ausgabealphabet, 286
Ausgabefunktion, 286
Ausgaberegister, 337
Ausgabeschaltnetz, 290
Ausgangslastfaktor, 155
Ausgangssignal, 140
Automat
 Akzeptor, 286
 endlicher, 286
 Mealy-, 288
 Moore-, 288
 Transduktor, 286
Axiome
 von Huntington, **90**
 von Robbins, 91

B

Back-end of line, 54
Backus-Naur-Form, 356
Bändermodell, 36
Bank, 324
Bank select, 326
Barrel-Shifter, **249**, 259, 416
Basis, 43, 61, 416
Basistechnologie, 140
 ECL, 141
 MOS, 141
 TTL, 140
Baumstruktur, 96
BCD-Code, **81**, 192, 259, 416
BDD, **125**, 158
Bedingter Sprung, 343, 363

- Befehlsausführung
 - spekulative, 392
 - Befehlsdecoder, 251
 - Befehlsholphase, 359
 - Befehlssatz, 352, 416
 - Benchmark, 402, 416
 - Dhrystone-, 403
 - Eispack-, 404
 - Lapack-, 404
 - Linpack-, 401, 404
 - natürlicher, 403
 - SPEC-, 404
 - synthetischer, 403
 - Whetstone-, 403
 - Benchmark-Kollektion, 402
 - Berechnungsmodell
 - universelles, 352, 363
 - Bevorrechtigte Eingänge, 416
 - Bevorrechtigter Eingang, 281
 - Bidirektionaler Zähler, 308
 - Big-Endian, 416
 - Big-Endian-Architektur, 68
 - Bindungsenergie, 36, 416
 - Bindungslücke, 38
 - Bindungspriorität, 99
 - Binärcode, 416
 - Binärcodiertes Dezimalsystem, 80
 - Binäres Entscheidungsdiagramm, **125**, 158, 416
 - geordnetes, 126
 - reduziertes, 127
 - Binärsystem, 62, 416
 - Binärzähler, 308
 - Bipolartransistor, 416
 - Biquinär-Code, 84, 85
 - Bit, 67, 416
 - Blockbildung, 189
 - inverse, 193
 - Blockmultiplikation, 338, 349, 417
 - Blue tape, 55
 - Bohr'sches Atommodell, 34
 - Boolesche Algebra, 90, 417
 - Mengenalgebra, 91
 - Schaltalgebra, 90, 93
 - Boolesche Differenz, 130
 - Boolesche Funktion, 94, 417
 - Boolesche Konstanten, 417
 - Boolescher Ausdruck, 96, 417
 - Branch prediction table, 393
 - Brown'sche Molekularbewegung, 38
 - Buffer, 170
 - Bug, 20
 - Bus, 417
 - Bus-Knoten, 355
 - Bus-Topologie, 355
 - Byte, 67, 417
- C**
- Cache, 393
 - assoziativer, 396
 - Block, 394
 - Controller, 393
 - direkt abgebildeter, 394
 - Hit, 393, 395
 - Level-*n*-, 394
 - Miss, 393, 395
 - Speicher, 417
 - vollassoziativer, 409
 - Carry-Bit, 218, 358, 364
 - Carry-look-ahead-Addierer, **221**, 263, 417
 - Carry-ripple-Addierer, **220**, 263, 417
 - Carry-save-Addierer, 229, 417
 - Carry-save-Format, **229**, 238, 417
 - Carry-save-Multiplizierer, 238, 417
 - Cell delay, 170
 - Cell-Prozessor, 30
 - Central processing unit, 27, 352, **356**
 - Charakteristik, 75, 417
 - Charakteristische Funktion, 163, 418
 - Chipausbeute, 53
 - Chip select, 326
 - Church'sche These, 363
 - CISC, 405, 418
 - CISC-Prozessor, 380
 - Clock enable, 281
 - CMOS-Schaltung, 151, 282
 - CMOS-Technik, 418
 - Code, 418
 - 2-aus-5-, 84
 - 2421-, 83
 - 74210-, 84, 85
 - 8421-, 81
 - Aiken-, 81, 83
 - BCD-, **81**, 192, 259
 - Biquinär-, 84, 85
 - einschrittiger, 83
 - Excess-3-, 81
 - fehlererkennender, 84
 - Glixon-, 88
 - Gray-, 81, **83**, 187, 288, 291
 - Hamming-, 329
 - m-aus-n-, 85
 - mehrschrittiger, 83
 - One-Hot-, 84, **85**, 368
 - progressiver, 83
 - reflektierter Biquinär-, 84, 85
 - Stibitz-, 81
 - Walking-, 85
- D**
- Code-Distanz, 85
 - Column address strobe, 323
 - Compiler, 353
 - Conditional-Sum-Addierer, 224, 418
 - Core microarchitecture, 30
 - CPI-Wert, 401
 - CPU, 27, 352, **356**
 - Current window pointer, 406
 - D-Flipflop, 277
 - D-Latch, 272
 - Dadda-Tree-Multiplizierer, 246, 418
 - Data line, 320
 - Datenbus, 355, 418
 - Datenfluss, 356
 - rückgekoppelter, 337
 - Datenregister, 365
 - Datenspeicher, 361
 - Datenwort, 336
 - Davio-Entwicklung
 - negative, 130
 - positive, 130
 - DCTL, 142
 - DDR-RAM, 326
 - De Morgan'sche Regel, 107, 111
 - erweiterte, 134
 - Decode, 359, 388
 - Decoder, 212, 346
 - Decodierphase, 359
 - Defektdichte, 53

- Defektelektron, 38
 Definitive Form, 418
 Delay
 Cell, 170
 Net, 171
 Demultiplexer, **211**, 257, 418
 Dezimalsystem, 61, 418
 binärcodiertes, 80
 Dhystone-Benchmark, 403
 Dicing, 55
 Die, 55
 Differenzenmaschine, 15
 Differenzenmethode, 15
 Digitaler Signalprozessor, 74, 251
 Digitaltechnik, 140
 DIMM, 321
 DIN
 40900, 157
 66000, 97
 Diode, 41, 418
 Direkte Kommunikation, 354
 Direkter Sprung, 363
 Disjunktion, 93
 Disjunktions-Matrix, 253
 Disjunktive Minimalform, 418
 Disjunktive Normalform, 119, 212, 419
 Displacement, 382, 419
 Distanz
 Code-, 85
 Hamming-, 85, 329
 Distributivgesetz, 91
 Division, 259
 Don't-Care-Belegung, 192, 199, 419
 Donator, 39
 Doppelnegationsgesetz, 110
 Dot diagram, 244
 Dotierung, 39, 419
 Double-precision-Format, 77
 Drain, 47
 DRAM, 27, 320, 419
 DTL, 142
 Duale Gleichung, 107
 Dualer Operator, 108
 Dualitätsprinzip, 105, 107, 419
 Dynamische Sprungvorhersage, 393
 Dynamischer Hazard, 419
 Dynamischer Speicher, 320
- E**
- E-Flipflop, 296
 ECL-Technik, 141
 Eigenleitung, 39
 Ein-/Ausgabebaustein, 354
 Einerkomplement, 70, 419
 Eingabealphabet, 286
 Eingaberegister, 337
 Eingang
 bevorrechtigter, 281
 -signal, 140
 -slastfaktor, 155
 Einkristall, 38
 Einschrittiger Code, 83
 Einsmenge, 120, 419
 Einzelkernprozessor, 352
 Eispack-Benchmark, 404
 Electronic Design Automation, 171
 Elektron
 Paarbildung, 38
 Rekombination, 38
 Elektronenloch, 38
 Elektronenmangelleiter, 40
 Elektronenstrom, 39
 Elektronenüberschussleiter, 39
 Elementaroperatoren, 419
 Eliminationsgesetz, 109
 ELSI, 25
 EM64T, 419
 EM64T-Architektur, 380
 Emitter, 43
 Emitter-Basis-Strecke, 43
 Emitter-Kollektor-Strecke, 43
 Enable-Eingang, 213
 Encoder, 346
 Endlicher Automat, 286, 419
 Endlosschleife, 368
 ENIAC, 20
 Entscheidungsdiagramm, 419
 Binäres, **125**, 158
 funktionales, **130**, 159
 Entwicklungssatz
 von Shannon, 127
 Erfüllbarkeit, 100
 Erholzeit, 323
 ESI, 386
- Espresso, 199
 Euklidischer Algorithmus, 375
 Excess-3-Code, 81
 Execute, 359, 388
 Exponent, 74, 420
 Extended-precision-Format, 79
 Extra-large-scale integration, 25
- F**
- Fallzeit, 170
 Fan-In, 155
 Fan-Out, 155
 FDD, **130**, 159
 FDIV-Bug, 74
 Feedback loop, 282
 Fehlererkennender Code, 84, 420
 Fehlererkennung, 327
 Fehlerkorrektur, 327
 Fehlerkorrigierender Code, 420
 Feldeffekttransistor, 47, 420
 Ferritkernspeicher, 24
 Festkommaformat, 18, 73, 420
 Festwertspeicher, 254
 FET, 47
 Fetch, 359, 388
 Finalzustand, 286
 Flächenbedarf, 184
 Flanke, 170
 Flankensteuerung, 274
 negative, 275
 positive, 275
 Flaschenhals
 Von-Neumann-, 356
 Fließbandprinzip, 388
 Fließkommazahl, 74
 Flip-Chip-Verfahren, 56, 425
 Flipflop, 274, 420
 D-, 277
 E-, 296
 JK-, 279
 Master-, 276
 RS-, 276
 Slave-, 276
 T-, 278
 Floating state, 145
 Flynn-Taxonomie, 378, 420

Folgeadresse, 347
 Formelsynthese, 161, 420
 definitorische, 164
 funktionale, 161
 relationale, 163
 Freie Variable, 94
 Frequenzteiler, 310
 Front-end of line, 53
 Funktion
 charakteristische, 163
 partielle, 190
 Funktionales Entscheidungsdiagramm,
 130, 159, 420
 Funktionseinheit, 337
 Funktions-Hazard, 174, 421
 Funktionstabelle, 94

G

Gate, 47
 Gatter, 156, 421
 Gatternetzliste, 157
 Gauß'sche Summenformel, 104, 223
 Gesetz von Moore, 22
 ggT, 375
 Gibi, 64
 Giga-scale integration, 25
 Gleichheitstest, 69
 Gleichung
 duale, 107
 Gleitkomma-division, 74
 Gleitkommaformat, 18, 74, 421
 Glixon-Code, 88
 GPU, 74, 407
 Grafikprozessor, 74, 407
 Grammatik, 96
 Gray-Code, 81, **83**, 187, 288, 291
 GSI, 25

H

Halbaddierer, 218, 421
 Halbleiter, 34, 421
 dotierter, 39
 reiner, 37
 Hamming-Code, 329
 Hamming-Distanz, 85, 329, 421

Hamming-Würfel, 85
 Handshaking, 325
 Handshaking-Protokoll, 349
 Hardware-Schaltung, 140
 Hazard-freie, 194
 Stromverbrauch, 174, 184
 Zeitverhalten, 169
 Hardware-Schleife, 382
 Harvard-Architektur, 20, **353**, 361, 421
 Harvard Mark I, 19
 Hazard, 171, 194, 421
 -frei, 194
 dynamischer, 172
 funktionaler, 174
 Logik-, 194
 logischer, 172
 Pipeline-, 391
 statischer, 171
 Hexadezimalsystem, 63, 421
 High-Pegel, 142
 High-Pegelbereich, 142
 Hilfsregister, 357
 Hitzesensor, 384
 Hochintegration, 140
 Huffman-Normalform, 290, 421
 Huntington'sche Axiome, **90**, 421

I

I/O, 354
 IA-32-Architektur, 380, 422
 IA-64-Architektur, 380, 422
 Idempotenzgesetz, 109
 IEEE 754, 422
 IEEE-754, 77
 Implikationsoperator, 99, 118
 Indirekte Adressierung, 381
 Indirekte Kommunikation, 355
 Individualisierung, 253
 Induktion
 strukturelle, 102
 vollständige, 102
 Ingot, 51, 422
 Initialzustand, 286
 Inkrementierer, 232, 422
 Input/Output, 354
 Instabiler Zustand, 269

Instruktionsarchitektur, 379, 422
 CISC-, 380
 RISC-, 384
 Instruktionsdecoder, 356, **368**, 376, 422
 Instruktionsregister, 365
 Instruktionszähler, 316, **358**, 365, 422
 Integrationsdichte, **57**, 58, 422
 Integrierter Schaltkreis, 26
 Intel, 27
 Interleaving, 324
 Interrupt, 328
 Intervallgrenze, 75
 Inverses Element, 91
 Inversionszone, 49
 Ion, 35
 IPC-Wert, 401

J

JFET, 47
 JK-Flipflop, 279

K

Kanallänge, **57**, 58, 422
 Karnaugh-Veitch-Diagramm, 186, 422
 Kerbensystem, 60, 422
 kgV, 375
 Kibi, 64
 Koeffizienten-Matrix, 235
 Kofaktor, 422
 negativer, 128
 positiver, 128
 Kollektor, 43
 Kombinatorische Schaltung, 157
 Kommunikation
 direkte, 354
 indirekte, 355
 Kommutativgesetz, 91
 Komparator, 213, 259, 422
 Komplexgatter, 175
 Komplexitätsanalyse, 167
 Kondensator, 320, 327
 Konjunktion, 93
 Konjunktionen-Matrix, 253
 Konjunktive Minimalform, 423
 Konjunktive Normalform, 119, 423

Konklusion, 99
 Konsistenzfunktion, 164
 Kontrollbus, 356
 Kontrollfluss, 356
 Korrektur-Tetrade, 82
 Kostenfunktion, 184, 423
 Kreuzprodukt, 407
 Kristallgitter, 37
 KV-Diagramm, 186
 dreidimensionales, 196

L

Label, 348
 Ladung, 320, 327
 Lapack-Benchmark, 404
 Large-scale integration, 25
 Lastfaktor, 155
 Latch, 274, 423
 D-, 272
 RS-, asynchrones, 267
 RS-, synchrones, 272
 Laufzeit, 184
 Layer, 54
 Leckstrom, 151, 321
 Leistungsbewertung, 399
 Leitungsband, 36
 Leitungselektron, 36
 Level-*n*-Cache, 394
 Linpack-Benchmark, 401, 404
 Literal, 119, 423
 Little-Endian, 423
 Little-Endian-Architektur, 68
 Load-Store-Architektur, 385, 423
 Löcherstrom, 39
 Lochkarte, 16
 Lochstreifen, 18
 Logik
 -ebene, 156
 -gatter, 156
 -polarität, 144
 -zelle, 156
 negative, 143
 positive, 143
 Logik-Hazard, 172, 194, 423
 Logikpolarität, 423
 Low-Pegel, 142

Low-Pegelbereich, 142
 LSI, 25

M

m-aus-n-Code, 85
 Mainframe, 25
 Majoritätsträger, 40
 Makro, 368
 Manchester Mark I, 23
 Mantisse, 73, 423
 Maschinenbefehl, 423
 Master-Flipflop, 276
 Master-Slave-Flipflop, 276, 423
 Matrix
 Disjunktions-, 253
 Koeffizienten-, 235
 Konjunktions-, 253
 Matrixmultiplizierer, 235, 261, 423
 Maxterm, **119**, 424
 Mealy-Automat, 288, 424
 Mebi, 64
 Medium-scale integration, 25
 Mehrkernprozessorsystem, 352
 Mehrphasentaktgeber, 365, 376
 Mehrschrittiger Code, 83
 Mengenalgebra, 91
 MFLOPS, 401
 Micromosaic, 25
 Mikroprogramm, 347, 384
 Mikroprogrammierung, 18, 343, 424
 Mikroprozessor, 27, 352, **356**, 424
 Mikrorechner, 352
 MIMD, 378
 Minicomputer, 26
 Minimierung, 424
 grafische, 186
 mehrstelliger Funktionen, 196
 partieller Funktionen, 190, 199
 tabellarische, 197
 Minimierungsziel, 182
 Minoritätsträger, 40
 Minterm, **119**, 212, 253, 424
 MIPS, 401
 Mischzähler, 314
 MISD, 378
 Mnemonic, 424

Mode
 Nibble, 324
 Page, 324
 Modell
 funktionales, 156
 Modellprozessor, 360
 Modulo-Operation, 375
 Moore's law, 32
 Moore'sches Gesetz, 32, 424
 Moore-Automat, 288, 424
 MOS-Schaltung, 145
 MOS-Technik, 141, 424
 MOSFET, 424
 n-Kanal-, 145
 p-Kanal-, 145
 MSI, 25
 Multiple Instruction
 Multiple Data, 378
 Single Data, 378
 Multiplexer, **207**, 256, 337, 424
 Multiplexing, 28
 Multiplikation, 259, 367
 Multiplizierer, 234, 424
 Carry-save-, 238
 Dadda-Tree-, 246
 Matrix-, 235, 261
 Wallace-Tree-, 241
 Multiprozessorsystem, 352, 395, 398
 MWIPS, 403

N

n-Kanal, 49
 n-Kanal-JFET, 47
 n-Leiter, 40
 Nachkommanormalisierung, 76
 NaN, 79
 NAND-Funktion, 99
 Napierstäbchen, 14
 Negation, 93, 252
 Negationskreis, 157
 Negationstheorem, 106
 Negative Logik, 143, 424
 Negative-Bit, 364
 Negative-Flag, 358
 Net delay, 171
 Netzliste, 157

Neunerkomplement, 82, 85
 Neutrales Element, 91
 Nibble mode, 324
 NMOS-Schaltung, 148
 NMOS-Technik, 425
 NOR-Funktion, 99
 NOR-Gatter, 268
 Normalform, 102, 425
 disjunktive, 119, 212
 konjunktive, 119
 Reed-Muller-, 122
 Normalisierung, 425
 Nachkomma-, 76
 Vorkomma-, 76
 Normalisierungsregel, 76
 Not a number, 79
 NP-hart, 199
 Nullmenge, 120, 425

O

ODER-Matrix, 376
 ODER-Verknüpfung, 93
 OFDD, **130**, 159
 Offsetzähler, 308
 O-Kalkül, 167, 425
 Oktalsystem, 62, 425
 One-Hot-Code, 84, **85**, 368, 425
 Opcode, 19
 Opcode-Feld, 387
 Operationswerk, 338, 425
 Operationswerksynthese, 338
 Operator
 abgeleiteter, 97
 dualer, 108
 Operatorensystem
 vollständiges, 97, 117

P

p-Kanal-JFET, 47
 p-Leiter, 40
 p-Wanne, 53
 Packaging, 55, 425
 Page, 322
 Page miss, 397
 Page mode, 324

Parallele Präfix-Funktion, 216
 Parallelmultiplizierer, 425
 Paritätsbit, 125, 328
 Paritätscode, 125
 Paritätsfunktion, **125**, 157, 215
 Partialprodukt, 234, 239
 Partielle Funktion, 425
 Patriot-Abwehrsystem, 66
 Peirce-Funktion, 99
 Performance rating, 401
 Pipeline, 18, **388**, 426
 -Hazard, 391
 flush, 393
 Superpipelining, **390**, 408
 Pipeline-Hazard, 425
 Pixel-Shader, 407
 PLA, 253
 Planartechnik, 50, 52, 426
 PLD, 253
 PMOS-Schaltung, 145
 PMOS-Technik, 426
 pn-Übergang, 41, 426
 Polaritätsindikator, 144
 Positive Logik, 143, 426
 Postinkrement, 381
 Postinkrement-Adressierung, 386
 PowerPC-Architektur, 386
 Prädikatenlogik, 165
 Prädiktion
 2-Bit-, 393
 Präfix-Addierer, 227, 426
 Präfix-Funktion
 parallele, 216
 Präfix-Logik, 215, 426
 Präfix-Schreibweise, 63
 Prämisse, 99
 Primblock, 190
 Primimplikant, 190
 Primimplikantentafel, 198
 Program counter, 358
 Programmable logic array, 253
 Programmable logic device, 253
 Programmierbare Logik, 253, 258, 426
 Programmspeicher, 361
 Programmsteuerung, 352
 Programmzähler, 316
 Progressiver Code, 83
 Protected mode, 29

Prüfbit, 329
 Pseudo-Tetrade, 81
 Puffer, 170
 Punktdiagramm, 243

Q

Quantor, 426
 boolescher, 165
 Quine-McCluskey-Verfahren, 197, 426
 Quine'sche Tabelle, 197

R

Radioaktive Strahlung, 328
 Radix-4-SRT-Division, 74
 RAM, 318, 426
 Random access memory, 318
 Range gate, 66
 Rank, 326
 Rationale Zahl, 63
 Raumladungszone, 41
 Read-only memory, 254
 Read-Signal, 319
 Rechenregel, 102
 abgeleitete, 109
 Rechenwerk, 356, 426
 Rechner, 352
 Rechnerklassifikation
 nach Flynn, 378
 nach Instruktionsarchitektur, 379
 Rechteckschwingung, 271
 Reduktionszelle
 Carry-save-, 230, 239
 Reed-Muller-Normalform, 122, 426
 Reflektierter Biquinär-Code, 84, 85
 Refresh-Logik, 327
 erweiterte, 329
 Regel
 von De Morgan, 107, 111
 Register, 300, 337, 427
 Akkumulator-, 305
 Auffang-, 300
 Ausgabe-, 337
 Daten-, 365
 Eingabe-, 337
 Hilfs-, 357

- Instruktions-, 365
 - Schiebe-, 302
 - Stapel-, 358
 - Status-, 358, 363
 - Umlauf-, 303
 - Universal-, **304**, 357
 - Register-Transfer-Ebene, 336, 427
 - Register-Transfer-Entwurf, 427
 - Registerbreite, 300, 360
 - Registerfenster, 406
 - Registersatz, 356
 - Rekonfigurierbarer Speicher, 384
 - Rekonvergenz, 161, 172, 427
 - Relais, 17
 - Relative Adressierung, 381
 - Relativer Sprung, 317, 363
 - Reset, 281, 331, 350, 427
 - Resistor, 43
 - Resistor-Transistor-Logik, 142
 - Ringzähler, 303
 - RISC, 405, 427
 - RISC-Prozessor, 384
 - Robbins-Algebra, 91
 - ROBDD, **125**, 158
 - Röhre, 22
 - ROM, 254, 427
 - Römische Zahlen, 60, 427
 - Row address strobe, 323
 - RS-Flipflop, 276
 - RS-Latch
 - asynchrones, 267
 - synchrones, 272
 - RTL, 142
 - Rückkopplungsschleife, 282
 - Rücksprungadresse, 358
 - Rückwärtszähler, 308
 - Rundungsfehler, 67
- S**
- Schalenmodell, 34
 - Schaltalgebra, 90, 93, 427
 - Schaltfunktion, 94
 - Schaltkreis, 427
 - integrierter, 26
 - Schaltkreisfamilie, 140, 427
 - Schaltnetz, 157, 427
 - Ausgabe-, 290
 - Hazard-freies, 194
 - Übergangs-, 289
 - zweistufiges, 158
 - Schaltung
 - kombinatorische, 157
 - sequenzielle, 266
 - Schaltungssynthese, 156, 428
 - BDD-basierte, 158
 - FDD-basierte, 159
 - zweistufige, 157
 - Schaltwerk, 266, 428
 - Schaltwerksynthese, 285, **289**
 - Schickard'sche Rechenuhr, 14
 - Schiebeoperation, 234
 - Schieberegister, 302, 428
 - rotierendes, 250
 - Schrankensteuerung, 350
 - Schrittlänge, 308
 - Schrittzählung, 317
 - Schwebezustand, 145
 - Scrubbing, 329
 - SDR-RAM, 326
 - SDRAM, 325
 - Seite, 322
 - Sequencer, 365, 428
 - Sequenzielle Schaltung, 266
 - Sequenzielles Element, 266
 - Shader, 407
 - Shannon'scher Entwicklungssatz, 127, 428
 - Sheffer-Funktion, 99
 - Sheffer-Stroke, 117
 - Signal
 - Ausgangs-, 140
 - Eingangs-, 140
 - Signalausbreitung, 169
 - Signalflanke, 170
 - Signalpfad, 336
 - Signalverzögerung, 169
 - SIMD, 378, 407
 - SIMM, 321
 - Single cristal, 38
 - Single Instruction
 - Multiple Data, 378
 - Single Data, 378
 - Single-precision-Format, 77
 - SISD, 378
 - Slave-Flipflop, 276
 - SLSI, 25
 - Small-scale integration, 25
 - Soft error, 328
 - Soroban, 13
 - Source, 47
 - SPARC-Prozessor, 406
 - SPEC-Benchmark, 404
 - SpeedStep-Technologie, 384
 - Speicher, **318**, 428
 - Cache-, 393
 - Daten-, 361
 - DDR-, 326
 - dynamischer, 320
 - Programm-, 361
 - rekonfigurierbarer, 384
 - SD-, 325
 - SDR-, 326
 - statischer, 318
 - virtueller, 397
 - Speicherbank, 324
 - Speicherchip, 321
 - Speicherelement, **266**, 428
 - asynchrones, 267
 - D-Flipflop, 277
 - D-Latch, 272
 - einflankengesteuertes, 275
 - flankengesteuertes, 274
 - JK-Flipflop, 279
 - RS-Flipflop, 276
 - RS-Latch
 - asynchrones, 267
 - synchrones, 272
 - T-Flipflop, 278
 - taktzustandsgesteuertes, 271
 - zweiflankengesteuertes, 275
 - Speicherhierarchie, 394, 428
 - Speicherindirekte Adressierung, 382
 - Speichermatrix, 322
 - Speicherordnung, 68, 428
 - Speicherphase, 359
 - Speicherschleife, 282
 - Speicherseite, 322
 - Speicherzeit, 169
 - Spekulative Befehlsausführung, 392
 - Spin-Coating-Verfahren, 52
 - Sprung
 - absoluter, 317

bedingter, 343, 363
 direkter, 363
 relativer, 317, 363
 unbedingter, 363
 Sprungbedingung, 347
 Sprungbefehl, 358, 367
 Sprungvorhersage, 393, 428
 dynamische, 393
 SRAM, 318, 428
 SRT-Division, 74
 SSI, 25
 Stabiler Zustand, 269
 Stack, 358
 Stapel, 358
 Stapelregister, 428
 Startzustand, 286
 Statischer Hazard, 428
 Statischer Speicher, 318
 Statusbit, 429
 Statusregister, 358, 363, 429
 Statusvariable, 338
 Stellensystem, 61
 Stellenwertsystem, 61, 429
 Stelligkeit, 94
 Stellvariable, 338
 Steuerbus, 429
 Steuerflussabhängigkeit, 392, 408, 429
 Steuerlogik, 337
 Steuersignal, 354
 Steuervariable, 338, 347
 Steuerwerk, 338, 356, 429
 -synthese, 340
 adressmodifizierendes, 346
 fest verdrahtetes, 343, 349
 mikroprogrammiertes, 343, 349
 Stibitz-Code, 81
 Strahlung
 radioaktive, 328
 Strichsystem, 60
 Stromverbrauch, 174, 184
 Strukturbreite, 57, 429
 Strukturelle Induktion, 102, 429
 Stschoty, 13
 Störimpuls, 171, 194
 Suan pan, 13
 Subtrahierer, 233, 429
 Subtraktionsregel, 60
 Suffix-Notation, 63

Summenbit, 219
 Super-large-scale integration, 25
 Supercomputer, 404
 Superpipelining, **390**, 408, 429
 Superskalartechnik, **391**, 408, 429
 Swizzle-Maske, 407
 Synchroner Zähler, 309, 331
 Synchrones RS-Latch, 272
 Synergistic Processing Unit, 30
 Synthese
 Operationswerk-, 338
 Schaltwerk-, 285
 Steuerwerk-, 340
 System/360, 25

T

T-Flipflop, 278
 T-Glied, 154
 Takt, 372, 429
 differenzieller, 326
 Taktflankensteuerung, 274
 Taktfrequenz, 271, 399
 Taktgeber
 Mehrphasen-, 376
 Taktsignal, 271
 Taktzustandssteuerung, 271
 Tautologie, 100, 429
 Taxonomie
 nach Flynn, 378
 nach Instruktionsarchitektur, 379
 Teile-und-herrsche, 224
 Terminal, 27
 Tetrade, 81
 Tetraden-Code, 80
 Timing closure, 171
 Top-500-Liste, 404
 Transduktor, 286, 430
 Transistor, 23, 42, 156, 320, 430
 Transistorebene, 156
 Transition, 269
 Transmissionsglied, 154
 Triode, 22
 Trägermenge, 91
 TTL-Technik, 140
 Turing-Maschine, 363

U

Überdeckung
 minimale, 198
 Übergangsschaltnetz, 289
 Übergangstabelle, 273, 430
 Überhitzungsschutz, 384
 Übertragsadditionsregel, 70
 Übertragsbit, 218
 Rekursionsschema, 221
 Übertragslogik, 314
 ULSI, 25
 Ultra-large-scale integration, 25
 Umladestrom, 151, 174
 Umlaufregister, 303, 330
 Unbedingter Sprung, 363
 UND-Verknüpfung, 93
 Universalregister, **304**, 357, 430
 Universelles Berechnungsmodell, 352, 363
 Unterprogrammaufruf, 358, 406

V

Vakuumröhre, 22
 Valenzband, 37
 Valenzelektron, 36
 Variable
 abhängige, 94
 freie, 94
 Status-, 338
 Stell-, 338
 Steuer-, 338, 347
 Variablenbelegung
 benachbarte, 186
 inkonsistente, 164
 konsistente, 164
 Vektorrechner, 378
 Venn-Diagramm, 92
 Verdrängungsstrategie, 397
 Verlustleistung, 151
 Vertex-Shader, 407
 Very-large-scale integration, 25
 Verzögerung
 RAS/CAS, 323
 Verzögerungsglied, 271
 Verzögerungslogik, 392

- Verzögerungszeit, 169
 Virtueller Speicher, 397, 430
 VLIW-Prozessor, 391
 VLSI, 25
 Volladdierer, 218, 430
 Vollasoziativer Cache, 409
 Vollständige Induktion, 102, 430
 Vollständiges Operatorensystem, 97, 117, 430
 Von-Neumann-Architektur, 23, 352, 430
 Von-Neumann-Flaschenhals, 356, 430
 Von-Neumann-Rechner, 430
 Vorkommanormalisierung, 76, 78
 Vorwärtszähler, 308
 Vorzeichenbitdarstellung, 69, 234, 431
- W**
- Wafer, 51, 53, 431
 Wahrheitstabelle, 94, 431
 Wahrheitstafel, 94
 Walking-Code, 85
 Wallace-Tree-Multiplizierer, 241, 431
 Wärmeentwicklung, 151
 Wartezyklus, 392, 408, 431
 Whetstone-Benchmark, 403
 Widerstand
 spezifischer, 37
 Wire-Bond-Verfahren, 56
 Wiring layer, 54
 Word line, 320
 Write, 388
 Write back, 359
 Write enable, 371
- Write-In-Strategie, 398
 Write-Through-Strategie, 397
- X**
- x86-Architektur, 379, 431
 XLSI, 25
 XOR-Verknüpfung, 99
- Z**
- Z3, 17
 Zahlencode, 80
 Zahlendarstellung
 explizite, 77
 gepackte, 77
 implizite, 77
 ungepackte, 77
 Zahlenformat, 431
 äquidistantes, 74
 Auflösungsgenauigkeit, 75
 Festkommadarstellung, 73
 Gleitkommadarstellung, 74
 rechnerinternes, 67
 Zahlensystem, 60, 431
 b-adisches, 62
 binäres, 62
 eineindeutiges, 69
 hexadezimales, 63
 oktales, 62
 redundantes, 69
 symmetrisches, 69
 unäres, 60
 Zähler, 308, 431
 asynchroner, 313, 330
 bidirektionaler, 308
 Binär-, 308
 gemischter, 314
 Instruktions-, 316, **358**, 365
 Offset-, 308
 synchroner, 309, 331
 Zeitdiagramm, 268, 431
 Zeitverhalten, 169
 Zellbibliotheken, 185
 Zelle, 156
 Zentraleinheit, 352
 Zero-Bit, 358, 364
 Ziffer, 60
 Zugriffszeit
 CAS-, 323
 RAS-, 323
 Zustand
 -smenge, 286
 -ssteuerung
 negative, 274
 positive, 274
 -svariable, 267
 -svektor, 285
 -sübergang, 269
 -sübergangsfunktion, 286
 -sübergangsgraph, 269
 instabiler, 269, 294
 stabiler, 269, 294
 Zustandsvariable, 431
 Zweierkomplement, **71**, 233, 252, 431
 Zweistufiges Schaltnetz, 431
 Zwischenglied, 140
 Zykluszeit, 323
 Zählrichtung, 308