

HANSER



Leseprobe

Taschenbuch der Mechatronik

Herausgegeben von Ekbert Hering, Heinrich Steinhart

ISBN (Buch): 978-3-446-43817-0

Weitere Informationen oder Bestellungen unter

<http://www.hanser-fachbuch.de/978-3-446-43817-0>

sowie im Buchhandel.

Vorwort zur 1. Auflage

Die Mechatronik beschreibt die **funktionale** und **räumliche Integration** von Komponenten aus den Bereichen **Mechanik**, **Elektronik** und **Informationsverarbeitung**. Sie ist zu einem wichtigen Innovationstreiber in Technik und Wirtschaft geworden. Im vorliegenden Taschenbuch sind die wichtigsten Themenbereiche der Mechatronik zusammengestellt.

Nach einer **Einführung** werden im ersten Kapitel die **mathematischen Grundlagen** vermittelt, die für das Verständnis der weiteren Kapitel notwendig sind. Die **Regelungstechnik** wird im zweiten Kapitel dargestellt. Sie ist eines der wichtigsten Teilgebiete der Mechatronik und beschäftigt sich mit der Analyse und Synthese von dynamischen Systemen. Das dritte Kapitel befasst sich mit der **Analogtechnik**, das vierte mit der **Digitaltechnik**. Die **Leistungselektronik** im fünften Kapitel beschreibt, wie mit Hilfe von elektronischen Ventilen das Steuern und Umformen von elektrischer Energie erfolgt. Für alle mechatronischen Systeme ist wichtig, das entscheidende Modell zu finden, das durch eine Computersimulation verifiziert werden kann. Die Schritte zur **Modellbildung** werden im sechsten Kapitel erläutert. Das siebte Kapitel behandelt die **mechanischen Teilsysteme**. Die Erfassung physikalischer und chemischer Größen durch elektrisch verarbeitbare Signale geschieht durch **Sensoren**. Sie werden im achten Kapitel vorgestellt. Den **Aktoren** sind drei Kapitel (9 bis 11) gewidmet, und zwar über **elektrische**, **hydraulische** und **pneumatische Aktoren**. Im Kapitel 12 sind die **Grundlagen der Informatik**, im Kapitel 13 die Arbeitsweise von **Mikrorechnern** behandelt. Kapitel 14 schließlich zeigt Anwendungsbeispiele für **mechatronische Systeme** aus vielen Bereichen.

Das vorliegende Taschenbuch ist als Nachschlagewerk für Studierende und Praktiker geschrieben. Für die sachkundige und konstruktive Mitarbeit möchten wir uns bei allen Autoren ganz herzlich bedanken. Unser Dank gilt aber auch Herrn Dipl.-Phys. Jochen Horn vom Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, der uns in allen Phasen der Entstehung des Werkes stets freundlich und erfolgreich mit Rat und Tat unterstützt hat.

Allen Lesern wünschen wir, dass sie mit dem Wissen und den Informationen dieses Taschenbuches ihre Aufgaben schnell, effizient und erfolgreich lösen können. Unsere Leser mögen aber auch beim Lesen des Werkes die Faszination spüren, welche das Gebiet der Mechatronik als Innovationsgeber ausübt. Gerne sind wir für Hinweise und Verbesserungen dankbar.

Aalen, im September 2004

Ekbert Hering
Heinrich Steinhart

Vorwort zur 2., verbesserten Auflage

Das Taschenbuch der Mechatronik hat sich seit vielen Jahren als ein erfolgreiches Lehrbuch und Nachschlagewerk für Studierende und Praktiker erwiesen. Nach nunmehr 10 Jahren war es notwendig geworden, den Innovationen auf dem Gebiet der Mechatronik Rechnung zu tragen und alle Kapitel des vorliegenden Buches grundlegend neu zu bearbeiten und unsere Leser auf die neueste Literatur aufmerksam zu machen. Viele Leser haben uns zu sinnvollen Korrekturen veranlasst und dafür möchten wir ihnen an dieser Stelle herzlich danken.

Für die sachkundige und konstruktive Mitarbeit möchten wir uns bei allen Autoren ganz herzlich bedanken. Unser Dank gilt aber in besonderer Weise Frau Dipl.-Min. Ute Eckardt vom Fachbuchverlag Leipzig im Hanser-Verlag, der uns in allen Phasen des Werkes mit Rat und Tat stets freundlich und erfolgreich unterstützt hat.

Allen unseren Lesern wünschen wir, dass sie mit dem Wissen und den Informationen dieses Taschenbuches ihre Aufgaben schnell, effizient und erfolgreich lösen können. Unsere Leser mögen aber auch beim Lesen des Werkes die Faszination spüren, welche das Gebiet der Mechatronik als Innovationsgeber ausübt. Gerne sind wir für Hinweise und Verbesserungen aus der Leserschaft dankbar.

Aalen, im März 2015

Ekbert Hering
Heinrich Steinhart

Inhaltsverzeichnis

Vorwort zur 1. Auflage	5
Vorwort zur 2., verbesserten Auflage	6
1 Mathematik	19
1.1 Komplexe Zahlen	19
1.1.1 Definition komplexer Zahlen	19
1.1.2 Darstellungsformen	19
1.1.2.1 Komplexe Zahlenebene	19
1.1.2.2 Polarformen	20
1.1.3 Rechenoperation mit komplexen Zahlen	21
1.1.3.1 Addition und Subtraktion	21
1.1.3.2 Multiplikation	21
1.1.3.3 Division	21
1.2 Matrizen	22
1.2.1 Quadratische Matrix	22
1.2.2 Symmetrische Matrix	22
1.2.3 Transponierte Matrix	23
1.2.4 Spaltenvektor	23
1.2.5 Zeilenvektor	23
1.2.6 Nullvektor 0	23
1.2.7 Einheitsmatrix I	23
1.3 Rechenregeln für Matrizen	24
1.3.1 Addition von Matrizen	24
1.3.2 Vektorrechnung	24
1.3.3 Skalares Produkt	25
1.3.4 Vektorprodukt	25
1.3.5 Multiplikation einer Matrix mit einem Skalar	26
1.3.6 Matrizenmultiplikation	26
1.3.7 Wichtige Gesetze für Matrizen	26
1.3.8 Determinante	26
1.3.9 Inverse Matrix	27
1.3.10 Darstellung von linearen Gleichungssystemen mithilfe von Matrizen	28
1.3.11 Eigenwerte und Eigenvektoren	29
1.4 Numerische Integration	30
1.4.1 Simpson'sche Formel	30
1.4.2 Summierende Simpson'sche Formel	31

1.5	Laplace-Transformation	31
1.5.1	Linearitätssatz	31
1.5.2	Verschiebungssatz	32
1.5.3	Dämpfungssatz	32
1.5.4	Integrationsatz	32
1.5.5	Differenziationsatz	32
1.5.6	Faltungssatz	32
1.5.7	Inverse Laplace-Transformation (Rücktransformation in den Zeitbereich)	33
1.6	Fourier-Transformation	37
1.7	Fourier-Reihen	38
2	Regelungstechnik	41
2.1	Regelsysteme	41
2.1.1	Gegenkopplung, ein universelles Prinzip	41
2.1.2	Struktur einer Regelung	43
2.1.3	Anforderungen an eine Regelung	46
2.2	Regelstrecke	49
2.2.1	Modellbildung	49
2.2.1.1	Experimentelle Modellbildung	49
2.2.1.2	Theoretische Modellbildung	50
2.2.2	Klassifikation des Übertragungsverhaltens	52
2.2.3	Linearisierung um den Arbeitspunkt	53
2.2.4	Darstellung von LZI-Systemen	57
2.2.4.1	Differenzialgleichung	57
2.2.4.2	Übertragungsfunktion	57
2.2.4.3	Zustandsraumdarstellung	59
2.2.4.4	Umformung des Wirkungsplans	62
2.3	Analyse der Regelstrecke	68
2.3.1	Dynamisches Grundverhalten	69
2.3.1.1	Beschreibung des Zeitverhaltens	69
2.3.1.2	P-T ₁ -Verhalten	70
2.3.1.3	P-T ₂ -Verhalten	71
2.3.1.4	P-T _n -Verhalten	73
2.3.1.5	Kurzzeichenzeichnungen	73
2.3.2	Analyse der Übertragungsfunktion	74
2.3.2.1	Stabilität	75
2.3.2.2	Anfangs- und Endwert	76
2.3.2.3	Übergangsverhalten	77
2.3.2.4	Einfluss der Zählernullstellen	79
2.3.2.5	Abschätzung des Streckenverhaltens	79
2.3.3	Analyse im Zustandsraum	81
2.3.3.1	Eigenwerte	81
2.3.3.2	Beobachtbarkeit und Steuerbarkeit	82
2.4	Regler	83

2.4.1	P-Regler	83
2.4.2	PI-Regler	85
2.4.3	PID-Regler	86
2.4.4	Schaltregler	88
	2.4.4.1 Zweipunktregler	88
	2.4.4.2 Dreipunktregler	90
2.5	Entwurf linearer Standardregler	91
	2.5.1 Übertragungsfunktionen des Regelkreises	91
	2.5.2 Wurzelortskurve	92
	2.5.3 Frequenzgangsentwurf	94
	2.5.4 Einstellregeln	97
	2.5.4.1 Einstellung nach Ziegler-Nichols	98
	2.5.4.2 Einstellung nach der Summenzeitkonstante	99
	2.5.4.3 Betragsoptimum und symmetrisches Optimum ..	100
	2.5.5 Erweiterte Regelkreisstrukturen	102
	2.5.5.1 Führungsfilter	102
	2.5.5.2 Kaskadenregelung	103
2.6	Digitalregler	104
	2.6.1 Struktur und Elemente des Abtastregelkreises	104
	2.6.2 Quasikontinuierlicher Entwurf	105
2.7	Entwurf von Zustandsreglern	106
	2.7.1 Struktur und Wirkung eines Zustandsreglers	107
	2.7.2 Entwurf eines allgemeinen Polvorgabereglers	108
	2.7.3 Zustandsbeobachter	110
	Literatur	111

3 Analogtechnik **112**

3.1	Analoge Schaltungen in der Mechatronik	112
3.2	Verstärkergrundsaltungen	113
	3.2.1 Prinzip der Verstärkung mit Transistoren	113
	3.2.2 Differenzverstärker	115
3.3	Operationsverstärker (OPV)	117
	3.3.1 Reale OPV und nichtideale Eigenschaften	118
	3.3.1.1 Frequenzgang	119
	3.3.1.2 Offsetspannung	120
	3.3.1.3 Gleichtaktverstärkung	120
	3.3.1.4 Eingangs- und Ausgangswiderstände	121
	3.3.2 Typische Kennwerte realer OPV	121
3.4	Grundsaltungen des OPV	122
	3.4.1 Invertierender Verstärker	122
	3.4.2 Nichtinvertierender Verstärker	124
3.5	Analogrechenschaltungen	125
	3.5.1 Subtrahier- und Summationsverstärker	125
	3.5.2 Instrumentenverstärker	127
	3.5.3 Analoge Multiplizierer und Dividierer	129

3.5.4	Differenzier- und Integrierglieder	129
3.5.5	Exponential- und Logarithmierglieder	130
Literatur	131

4 Digitaltechnik 132

4.1	Schalterlogik und binäre Signale	132
4.1.1	Gesteuerte Schalter und Logikpegel	132
4.1.2	Logikdefinitionen und -funktionen	133
4.2	Boole'sche Algebra	135
4.2.1	Variablendefinition und Verknüpfungen	135
4.2.2	Postulate der Boole'schen Algebra	136
4.2.3	Rechenregeln der Boole'schen Algebra	137
4.2.4	Boole'sche Gleichungen und Logikgatter	137
4.3	Das Transmissionsgatter	139
4.4	Kombinatorische Schaltungen	140
4.4.1	Allgemeines	140
4.4.2	Optimierung von Schaltfunktionen	141
4.4.2.1	Minimierung einer AND-OR-Schaltfunktion	141
4.4.2.2	Realisierung auf Gatterniveau	143
4.4.2.3	Aktuelle Aspekte	143
4.4.3	Codierschaltungen (Codierer und Decoder)	144
4.4.4	Multiplexer und Demultiplexer	146
4.4.5	Rechenschaltungen	147
4.4.5.1	Addierer	148
4.4.5.2	Subtrahierer	149
4.4.5.3	Komparatoren	149
4.4.5.4	Multiplizierer und Dividierer	150
4.4.6	Festwertspeicher	151
4.5	Flipflops	152
4.5.1	Allgemeines	152
4.5.2	Ungetaktete Flipflops	152
4.5.3	Taktzustandgesteuertes D-Flipflop	153
4.5.4	Flankengesteuertes D-Flipflop	154
4.5.5	Weitere Arten flankengesteuerter Flipflops	156
4.6	Praktische sequenzielle Schaltungen	158
4.6.1	Register	158
4.6.2	Zähler und Teiler	159
4.6.2.1	Asynchrone Zähler und Teiler	160
4.6.2.2	Synchrone Zähler	160
4.6.3	Synchrone sequenzielle Schaltungen als Zustandsmaschinen	161
4.6.3.1	Moore-Automat	161
4.6.3.2	Mealy-Automat	162
4.6.3.3	Methodisches Beispiel	163
4.7	Realisierungen digitaler Schaltungen	165

4.7.1	Standard-Logikbausteine	165
4.7.2	Programmierbare Logikbausteine (PLD)	166
4.7.3	Anwenderspezifische Schaltkreise	170
	Literatur	170

5 Leistungselektronik 171

5.1	Elektronische Ventile	171
5.1.1	Leistungsdiode	172
5.1.2	Thyristor	173
5.1.3	Gate-Turn-Off-Thyristor (GTO)	174
5.1.4	Bipolartransistor	174
5.1.5	MOSFET	175
5.1.6	Insulated-Gate-Bipolartransistor (IGBT)	175
5.2	Selbstgeführte Stromrichter	176
5.2.1	Tiefsetzsteller	176
5.2.2	Vierquadrantensteller	179
	5.2.2.1 Gleichzeitige Taktung	180
	5.2.2.2 Alternierende Taktung	180
5.2.3	Selbstgeführte Drehstrombrückenschaltung	181
5.2.4	Pulsbreitenmodulation (PBM)	184
5.2.5	Modellbildung von dreiphasigen Stromrichtern	186
	Literatur	188

6 Modellbildung 189

6.1	Grundbegriffe	189
6.2	Modellierungs- und Simulationsprozess	190
	6.2.1 Zyklen	190
	6.2.2 Modellerstellung und -verfeinerung	192
6.3	Modellansätze	193
6.4	Modellklassen	194
6.5	Beschreibungsmittel	195
	6.5.1 Beschreibung im Zeitbereich	195
	6.5.2 Beschreibung im Bildbereich	197
	6.5.3 Grafische Beschreibung	197
6.6	Modellelemente	199
	6.6.1 Steuerungs- und Regelungstechnik	199
	6.6.2 Mechanik	201
	6.6.3 Elektrotechnik	202
	6.6.4 Mechanische und elektrische Analogien	204
6.7	Methoden und Werkzeuge der Modellbildung	206
	6.7.1 Analytische Methoden	206
	6.7.1.1 Mechanik	208
	6.7.1.2 Elektrotechnik	210
	6.7.2 Synthetische Methoden	213

	6.7.2.1	Mechanik	213
	6.7.2.2	Elektrotechnik	215
	6.7.2.3	Bondgraphen	216
6.7.3		Experimentelle Modellbildung	216
	6.7.3.1	Datenerhebung	218
	6.7.3.2	Festlegung der Modellstruktur	219
	6.7.3.3	Parameteridentifikation	221
6.8		Werkzeuge der Modellbildung	222
		Literatur	223

7 Mechanische Systeme **224**

7.1		Modelle in der Mechanik	224
7.2		Kinematik	226
	7.2.1	Einführung	226
	7.2.2	Kinematik des Massenpunktes	226
		7.2.2.1 Darstellung der Bewegung in kartesischen Koordinaten	226
		7.2.2.2 Darstellung der Bewegung eines Massenpunktes in Zylinderkoordinaten	229
		7.2.2.3 Darstellung der Bewegung eines Massenpunktes in Kugelkoordinaten	230
	7.2.3	Kinematik des starren Körpers	231
		7.2.3.1 Notation	231
		7.2.3.2 Translation und Rotation	232
		7.2.3.3 Euler-Winkel	234
	7.2.4	Kinematik des Mehrkörpersystems	235
		7.2.4.1 Klassifikation	235
		7.2.4.2 Holonome Starrkörpersysteme mit kinematischer Baumstruktur	236
		7.2.4.3 Denavit-Hartenberg-Notation	237
7.3		Kinetik	240
	7.3.1	Einführung	240
	7.3.2	Kinetik des Massenpunktes	241
		7.3.2.1 Impulssatz	241
		7.3.2.2 Drehimpulssatz	244
		7.3.2.3 Arbeitssatz	244
		7.3.2.4 Energiesatz	245
	7.3.3	Kinetik des starren Körpers	246
		7.3.3.1 Schwerpunktsatz	246
		7.3.3.2 Drehimpulssatz	246
		7.3.3.3 Arbeitssatz	249
		7.3.3.4 Energiesatz	249
	7.3.4	Kinetik des Mehrkörpersystems	253
		7.3.4.1 Prinzip von d'Alembert	253
		7.3.4.2 Lagrange'sche Gleichungen 2. Art	254

7.3.5	Der Lagrange-Formalismus für elektromechanische Systeme	258
7.4	Schwingungstechnik	260
7.4.1	Freie gedämpfte Schwingungen	260
7.4.1.1	Starke Dämpfung, Kriechfall ($D > 1$)	261
7.4.1.2	Mittlere Dämpfung, Aperiodischer Grenzfall ($D = 1$)	262
7.4.1.3	Schwache Dämpfung, Schwingfall ($D < 1$)	262
7.4.2	Erzwungene gedämpfte Schwingungen	265
7.4.2.1	Klassifizierung der erzwungenen Schwingungen nach dem Ort der Erregung	265
7.4.2.2	Partikuläre Lösung der Schwingungsdifferenzialgleichung	267
7.4.2.3	Vergrößerungsfunktionen und Phasenwinkel ...	268
	Literatur	271

8 Sensoren **272**

8.1	Allgemeiner Aufbau	272
8.1.1	Beschreibungen	273
8.1.1.1	Messgrößen und Maßeinheiten	273
8.1.1.2	Kenngrößen	274
8.1.1.3	Statisches Verhalten	275
8.1.1.4	Dynamisches Verhalten	276
8.1.2	Anforderungen	278
8.2	Einteilung von Sensoren	279
8.3	Direkt umsetzende Sensoren	281
8.3.1	Aktive Sensoren	281
8.3.1.1	Piezoelektrischer Effekt	281
8.3.1.2	Elektrodynamischer Effekt	282
8.3.1.3	Fotoelektrischer Effekt	283
8.3.1.4	Seebeck-Effekt	284
8.3.1.5	Elektrochemischer-Effekt	285
8.3.2	Passive resistive Sensoren	286
8.3.2.1	Potenziometrische Sensoren	286
8.3.2.2	Dehnungsmessstreifen (DMS)	287
8.3.2.3	Fotowiderstand	288
8.3.2.4	Widerstandsthermometer	288
8.3.2.5	Feldplatte	290
8.3.2.6	Gasdetektor	291
8.3.3	Passive kapazitive Sensoren	291
8.3.3.1	Geometrische Effekte	291
8.3.3.2	Dielektrizitätseffekte	292
8.3.3.3	Näherungsschalter	293
8.3.3.4	Feuchtemessung	294
8.3.4	Passive induktive Sensoren	295

	8.3.4.1	Positionsmessung	295
	8.3.4.2	Näherungsschalter	295
8.4		Indirekt umsetzende Sensoren	296
	8.4.1	Weg, Strecke	296
	8.4.1.1	Triangulation	296
	8.4.1.2	Ultraschall	297
	8.4.1.3	Magnetostriktion	298
	8.4.1.4	Optisch	299
	8.4.2	Füllstand	301
	8.4.2.1	Radioaktiv	301
	8.4.2.2	Schwinggabelsensor	302
	8.4.3	Geschwindigkeit	303
	8.4.3.1	Impulszählung	303
	8.4.3.2	Korrelation	304
	8.4.4	Druck und Kraft	304
	8.4.4.1	Dehnungsmessstreifen (DMS)	304
	8.4.4.2	Magnetoelastisch	305
	8.4.5	Beschleunigung	306
	8.4.6	Durchfluss	307
	8.4.6.1	Druckdifferenz	307
	8.4.6.2	Hitzdraht	308
	8.4.6.3	Magnetisch-induktiv	309
	8.4.7	Magnetfeld	309
	8.4.7.1	Hall-Sonde	309
	8.4.7.2	Sättigungskernsonde	310
	8.4.8	Temperatur	311
	8.4.9	Konzentration	312
	8.4.9.1	λ -Sonde	312
	8.4.9.2	Ionensensitive Feldeffekttransistoren	313
	Literatur		314

9 Elektrische Aktoren **315**

9.1		Gleichstrommaschine (GM)	316
	9.1.1	Aufbau der Antriebsstruktur	316
	9.1.2	Analyse der Strecke	317
	9.1.3	Berechnung des Ankerstromreglers	319
	9.1.4	Berechnung des Drehzahlreglers	322
9.2		Feldorientierte Steuerung einer Synchronmaschine (SM)	323
	9.2.1	Beschreibung der Synchronmaschine im rotorfesten Bezugssystem	325
	9.2.2	Berechnung des inneren Drehmoments	326
	9.2.3	Struktur der läuferflussorientierten Regelung	328
	9.2.4	Berechnung der Stromregler	330
9.3		Hubmagnet	332
9.4		Schrittmotor	336

9.4.1	Vollschrittbetrieb	339
9.4.2	Halbschrittbetrieb	339
9.4.3	Start-Stopp-Rampe	340
9.4.4	Stromregelung	341
9.5	Asynchronmaschine (ASM)	343
	Literatur	348

10 **Hydraulische Aktoren** **349**

10.1	Vor- und Nachteile hydraulischer Antriebe	349
10.2	Zahnradpumpe mit Außenverzahnung	350
10.3	Flügelzellenpumpe	351
10.4	Axialkolbenpumpe	351
10.5	Ventil	352
10.5.1	Proportionalventil	352
10.5.2	Servoventil	353
10.6	Hydraulik-Zylinder und -Motor	355
10.6.1	Hydraulisches Teilmodell	356
10.6.2	Vereinfachtes Modell	361
10.7	Steuerung und Regelung	364
10.7.1	Istwerterfassung	364
10.7.2	Steuerung	364
10.7.3	Regelung	364
10.8	Auslegen eines hydraulischen Antriebes	365
	Literatur	366

11 **Pneumatische Aktoren** **367**

11.1	Erzeugung und Aufbereitung der Druckluft	367
11.2	Wegeventil	368
11.3	Zylinder und Greifer	369
11.3.1	Zylinder mit Kolbenstange	369
11.3.2	Kolbenstangenlose Zylinder	369
11.4	Greifer	370
11.5	Steuerung und Regelung	375
11.5.1	Analoge Wegerfassung	375
11.5.2	Digitale Wegerfassung	377
11.6	Steuerung	378
11.7	Regelung	378
11.8	Pneumatisches Handhabungsgerät	378
11.9	Auslegung eines pneumatischen Antriebs	380
	Literatur	381

12 **Informatik (Computer Science)** **382**

12.1	Gegenstand	382
------	------------	-----

12.2	Grundlagen der Informationsverarbeitung	383
12.2.1	Daten, Zeichen, Maschinenwort	383
12.2.2	Zahlensysteme	385
12.2.3	Darstellung von Zeichen, Ziffern und Zahlen	386
12.2.3.1	Darstellung von alphanumerischen Zeichen	387
12.2.3.2	Darstellung von Ziffern	387
12.2.3.3	Darstellung von Zahlen	388
12.3	Programmierung und Softwareentwicklung	390
12.3.1	Algorithmen und Notationen	390
12.3.2	Variable, Ausdrücke und Zuweisungen	391
12.3.3	Zusammengesetzte Datentypen	392
12.3.4	Zeigervariablen	393
12.3.5	Datenstrukturen	393
12.3.6	Programmierung und Softwareentwicklung	394
12.3.7	Programmiersprachen	394
12.3.8	Programmierparadigmen	396
12.3.9	Entwicklungswerkzeuge	399
12.4	Struktur und Organisation von Rechnern	400
12.4.1	Von-Neumann-Rechnerkonzept	400
12.4.2	Komponenten	401
12.4.3	Schnittstellen	402
	Literatur	403

13 Mikrorechentechnik

404

13.1	Aufbau und Organisation von Mikrorechnern	406
13.2	Arbeitsweise eines Mikrorechners	407
13.2.1	Befehlssatzarchitektur	408
13.2.2	Adressierungsarten	409
13.2.3	Befehlsformat	410
13.2.4	Komplexität von Befehlssätzen	411
13.2.5	Optimierungstechniken	412
13.3	Peripheriebausteine	415
13.4	Eingebettete Systeme	417
13.4.1	Universalprozessoren	417
13.4.2	Mikrocontroller (μC)	418
13.4.3	Digitale Signalprozessoren (DSP)	420
13.5	Beispiele für Prozessoren	421
13.5.1	32-Bit-Mikrocontroller mit Cortex-M3-Kern	421
13.5.2	8086-kompatible Prozessoren	425
	Literatur	429

14 Mechatronische Systeme

430

14.1	Elektronischer Zündstartschalter	430
14.1.1	Funktionen	430

14.1.2	Mechanische Komponenten	432
14.1.3	Hardware-Komponente	435
14.1.4	Software-Komponente	436
14.2	Bedienfelder mit CAN-Elektronik	440
14.3	Einzelvernetzter Schalter „MAXIS“	441
14.3.1	Mechanischer Aufbau	441
14.3.2	Schaltsystem	442
14.3.3	Leiterplatte und Betätiger	443
14.3.4	Stecker	443
14.3.5	Elektronik	443
14.4	Piezo-Inline-Injektor	445
14.5	Getriebeautomatisierung am Beispiel Durashift EST	445
14.5.1	Systembeschreibung	445
14.5.2	Software	449
14.5.3	Vorteile des mechatronischen Konzepts	450
14.6	Antiblockiersystem (ABS)	451
14.7	Antriebsschlupfregelung (ASR)	452
14.8	Regelung der Fahrdynamik (ESP)	453
14.9	Kompensation mechanischer Fehler	456
14.10	Bewegen großer Lasten	458

Sachwortverzeichnis	459
----------------------------------	------------

4

Digitaltechnik

Die heutige Technik der Informationsverarbeitung ist im Wesentlichen durch die Digitaltechnik auf der Basis elektronischer Schaltungen geprägt. Seit mehr als 60 Jahren spielen dabei Halbleiterbauelemente eine entscheidende Rolle, weil sie in immer kleineren Abmessungen herstellbar sind und dabei pro Schaltprozess immer weniger Energie benötigen. Im Zuge der Integration dieser Bauelemente eröffneten sich Perspektiven, komplexe und aus vielen Millionen Einzeloperationen zusammengesetzte Algorithmen mit praktikablen Reaktionszeiten und vertretbarem technischen Aufwand zur Anwendung zu bringen. Die hiermit verbundenen technischen Entwicklungslinien entstammen den folgenden Kategorien:

- Entwicklung **algorithmischer Methoden** zur Informationsverarbeitung und Bereitstellung der hierzu nötigen Entwurfswerkzeuge.
- Technische Abbildung der Informationen und logischen Verarbeitungsschritte mit **extrem hohen Arbeitsgeschwindigkeiten**.
- Technologische Voraussetzungen für die **preisgünstige Herstellung** einer sehr großen Anzahl von binären Schaltelementen.
- Hierarchische Strukturierung und Definition von Funktionsblöcken mit **universellem Charakter**.

■ 4.1 Schalterlogik und binäre Signale

4.1.1 Gesteuerte Schalter und Logikpegel

Ein elektronischer Schalter ist der Grundbaustein für die meisten der heute verwendeten digitalen Schaltungen. Im einfachsten Falle lassen sich die beiden Zustände „eingeschaltet“ (niedriger elektrischer Widerstand) und „ausgeschaltet“ (hoher elektrischer Widerstand) definieren. Als elektronischer Schalter eignet sich der Transistor. Er verfügt über einen dritten Anschluss (Basis oder Gate) zur Steuerung. Die dort angelegte Spannung bestimmt den Zustand des Schalters. Bestimmte Spannungsintervalle, die auf den gleichen Schaltzustand abgebildet werden, bezeichnet man als Logikpegel und definiert diese wie folgt:

Logikpegel: Das auf der Spannungsachse weiter zum positiven Bereich gelegene Intervall trägt die Bezeichnung **High-Pegel** (H). Entsprechend wird dem weiter zum negativen Bereich gelegenen Intervall die Bezeichnung **Low-Pegel** (L) zugeordnet. Zwischen H- und L-Pegel liegt ein verbotener Bereich.

Steuerspannungen im verbotenen Bereich führen in der Regel dazu, dass ein Transistor nicht mehr sicher als ein- oder ausgeschalteter Schalter angenommen werden kann. Bei der gegenwärtig am häufigsten verwendeten CMOS-Technik (Complementary Metal Oxid Semiconductor) greift man ausschließlich auf n- und p-Kanal-Feldeffekttransistoren zurück. Diese benötigen vernachlässigbar kleine Ströme zur Steuerung, weshalb hier das Modell eines spannungsgesteuerten Schalters besser zutrifft als für bipolare Transistoren. Die Modellierung der am meisten gebräuchlichen Feldeffekttransistoren als Schalter ist in Bild 4.1 dargestellt.

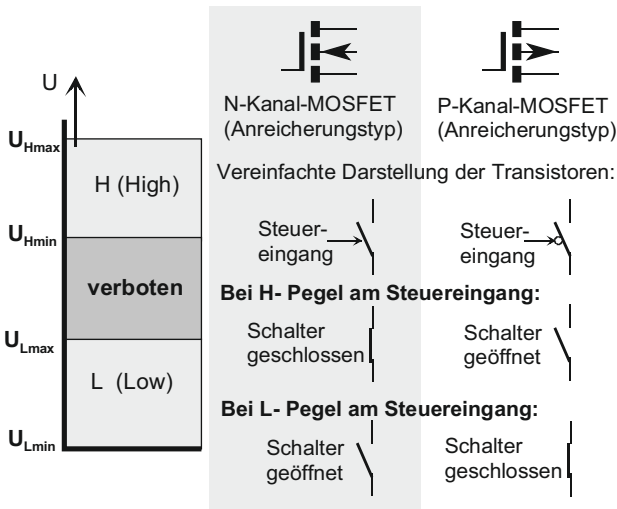


Bild 4.1 Pegeldefinition und Vereinfachung von MOSFETs (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) zu gesteuerten Schaltern

Ein Vorteil dieser Darstellungsform ist, dass man elementare Transistorfunktionen nicht weiter betrachten muss.

4.1.2 Logikdefinitionen und -funktionen

Digitale Signale stellen Informationen mit den binären Elementen '0' und '1' dar. Die Bezeichnung der Elemente '0' und '1' in Hochkommata entstammt der VHDL-Notation (VHDL: Very High Speed Integrated Circuit Hardware Description Language). Elektrische Werte hingegen werden in der Digitaltechnik immer mit den Pegeln H oder L bezeichnet.

Positive Logik bedeutet die Zuordnung des H-Pegels zum logischen Wert '1' und des L-Pegels zum logischen Wert '0'. Bei umgekehrter Zuordnung spricht man von **negativer Logik** (Bild 4.2).

Die einfachste, technisch relevante Zusammenschaltung eines N- und eines P-Kanal-MOSFETs ist der **Inverter**. Dieser kehrt den elektrischen Eingangspegel in den entgegengesetzten Wert am Ausgang um. Voraussetzung ist das Anlegen einer geeigneten Arbeitsspannung. In der CMOS-Technik ist es üblich, U_{Lmin} gleich der negativen Versorgungsspannung (meist Masse = Ground, kurz GND) zu setzen, während U_{Hmax} gewöhnlich einer positiven Versorgungsspannung (hier V_{DD}) entspricht.

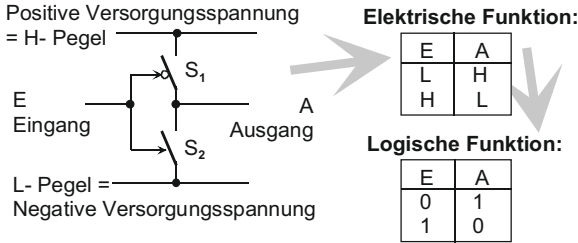


Bild 4.2 Technische Realisierung der Negation

Zur Funktion: L-Pegel an E bewirkt, dass S_1 geschlossen ist und der komplementäre Schalter S_2 öffnet. Folglich liegt am Ausgang A ein H-Pegel an. Bei H-Pegel am Eingang ist S_1 geöffnet und S_2 geschlossen, der Ausgang führt daher L-Pegel. Die logische Abbildung dieser Funktion ist die Negation: $A = \bar{E}$.

Für die logische Verknüpfung von mehreren unabhängigen Eingangssignalen x_i müssen jeweils separat zu steuernde Schalter S_i verwendet werden. Prinzipielle Möglichkeiten hierzu bestehen in der Reihen- und der Parallelschaltung. Eine Logikfunktion resultiert dabei aus den grundlegenden Gesetzmäßigkeiten für den elektrischen Stromfluss:

- Zwei Schalter sind parallel geschaltet: S ist geschlossen wenn S_1 ODER S_2 geschlossen ist (Bild 4.4a).
- Zwei Schalter sind in Reihe geschaltet: S ist geschlossen wenn S_1 UND S_2 geschlossen sind (Bild 4.3).

Durch Anwendung dieser Regeln lassen sich verschiedene logische Funktionen mit Schaltermodellen darstellen.

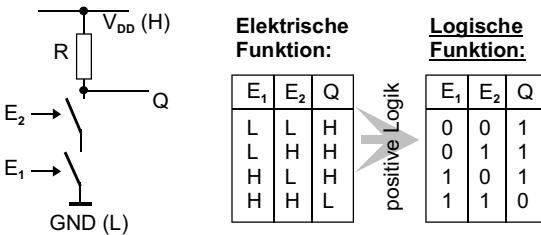


Bild 4.3 Variante zur Darstellung eines NAND-Gatters

Werden in Bild 4.3 beide Eingänge E_1 und E_2 auf H-Pegel gelegt, tritt ein ständiger Stromfluss auf und es wird dauerhaft elektrische Leistung in Wärme umgesetzt. Dieser Nachteil wird bei der CMOS-Technik (Bild 4.4b) vermieden.

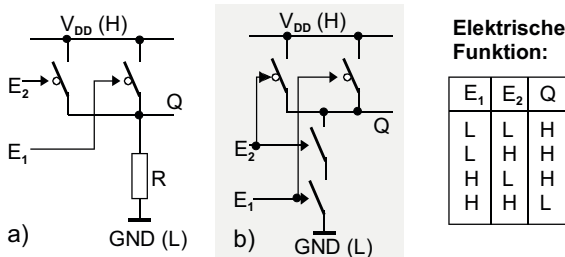


Bild 4.4 Alternative Varianten zur Realisierung des NAND-Gatters (positive Logik vorausgesetzt). Die Variante b) entspricht der CMOS-Technik.

Durch Reihen- und Parallelschaltung weiterer Schalter lassen sich beliebige logische Verknüpfungen aus einer hohen Anzahl von Eingangssignalen gewinnen. Die Zuordnung der elektrischen Signale zu logischen Variablen gestattet die technische Nutzung der *Boole'schen* Algebra.

■ 4.2 Boole'sche Algebra

Binäre Variablen können genau zwei Werte annehmen. Man verwendet

- in der **Aussagenlogik** die Wahrheitswerte 'wahr' und 'falsch',
- in der **Schalterlogik** die Schalterzustände 'ein' und 'aus', und
- in **elektronischen Schaltungen** die Pegel 'Low' und 'High'.

Die *Boole'sche* Algebra greift ausschließlich auf die binären Ziffern '0' und '1' zurück. Bei der Abbildung auf technische Systeme muss man sich für positive oder negative Logik entscheiden (s. Abschn. 4.1.2).

4.2.1 Variablendefinition und Verknüpfungen

Es sei mit x oder x_i eine Variable definiert, deren Wertevorrat der Trägermenge $B = \{0,1\}$ entstammt. Für derartige binäre Variablenwerte gelte die Eindeutigkeit:

$x = 0$ bedeutet immer auch $x \neq 1$ und

$x = 1$ bedeutet immer auch $x \neq 0$.

Zur Beschreibung der logischen Verknüpfung von zwei Variablen seien die folgenden Symbole verwendet:

\wedge	Operator der Konjunktion (UND, AND)	auch: \cdot oder $\&$
\vee	Operator der Disjunktion (ODER, OR)	auch: $+$ oder $ $
$-$	Operator der Negation (Nicht, NOT)	auch: $/$
\leftrightarrow	Operator für die Äquivalenz (Gleichheit)	auch: \equiv
\leftrightarrow	Operator für die Antivalenz (XOR)	auch: \oplus

Bei n voneinander verschiedenen Eingangsvariablen gibt es 2^{2^n} unterschiedliche Möglichkeiten, um eine Schaltfunktion der Form $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ darzustellen. Für $n = 0$ bis $n = 4$ ergeben sich folgende Möglichkeiten:

$n = 0$ eine Menge von 2 Funktionen (zwei Konstanten),

$n = 1$ eine Menge von 4 Funktionen (Konstanten, Identität, Negation),

$n = 2$ eine Menge von 16 Funktionen,

$n = 3$ eine Menge von 256 Funktionen,

$n = 4$ eine Menge von 65536 Funktionen.

Für die logische Verknüpfung von mehr als zwei Variablen sind hauptsächlich die Konjunktion und die Disjunktion von Bedeutung.

4.2.2 Postulate der Boole'schen Algebra

Aus der Eindeutigkeit binärer Werte folgt für die Negation:

$$\bar{\bar{x}} = x \quad \bar{0} = 1 \quad \bar{1} = 0$$

Ein logischer Ausdruck kann mit dem neutralen Element einer Grundfunktion erweitert bzw. gekürzt werden, ohne dass der Wert des logischen Ausdrucks verändert wird.

Die 0 ist das neutrale Element der Disjunktion: $0 \vee x_1 = x_1$

Die 1 ist das neutrale Element der Konjunktion: $1 \wedge x_1 = x_1$

Disjunktion und Konjunktion lassen sich durch die beiden **De Morgan'schen Gesetze** in die jeweils andere Verknüpfung übertragen. Beispielsweise gilt eine Gleichwertigkeit der beiden Gleichungen

$$y = x_1 \wedge x_2 \quad \text{und} \quad \bar{y} = \bar{x}_1 \vee \bar{x}_2.$$

Veranschaulichen lässt sich diese Dualität beispielsweise mit der Schalterlogik. Für eine Reihenschaltung zweier Schalter bildet die linke Gleichung folgende Aussage ab: „Die Reihenschaltung y bildet einen geschlossenen Schalter, wenn der Schalter x_1 UND der Schalter x_2 geschlossen sind“. Die rechte Gleichung hingegen kann so interpretiert werden: „Die Reihenschaltung y bildet keinen geschlossenen Schalter, wenn der Schalter x_1 ODER der Schalter x_2 geöffnet (also nicht geschlossen) sind“.

4.2.3 Rechenregeln der Boole'schen Algebra

Nachfolgend sind die wichtigsten Regeln für den Umgang mit logischen Ausdrücken aus AND- und OR-Verknüpfungen aufgeführt:

Kommutativgesetz (Vertauschungsregel):

Für die OR-Verknüpfung: $x_1 \vee x_2 = x_2 \vee x_1$

Für die AND-Verknüpfung: $x_1 \wedge x_2 = x_2 \wedge x_1$

Assoziativgesetz (Verknüpfungsregel):

$$x_1 \vee (x_2 \vee x_3) = (x_1 \vee x_2) \vee x_3$$

$$x_1 \wedge (x_2 \wedge x_3) = (x_1 \wedge x_2) \wedge x_3$$

Distributivgesetz:

$$(x_1 \vee x_2) \wedge (x_1 \vee x_3) = x_1 \vee (x_2 \wedge x_3)$$

$$(x_1 \wedge x_2) \vee (x_1 \wedge x_3) = x_1 \wedge (x_2 \vee x_3)$$

Theoreme von De Morgan:

$$\overline{x_1 \vee x_2} = \bar{x}_1 \wedge \bar{x}_2$$

$$\overline{x_1 \wedge x_2} = \bar{x}_1 \vee \bar{x}_2$$

Kürzungsregeln:

$$x_1 \vee (x_1 \wedge x_2) = x_1$$

$$x_1 \wedge (x_1 \vee x_2) = x_1$$

$$(x_1 \wedge x_2) \vee (x_1 \wedge \bar{x}_2) = x_1$$

$$(x_1 \vee x_2) \wedge (x_1 \vee \bar{x}_2) = x_1$$

$$x_1 \vee (\bar{x}_1 \wedge x_2) = x_1 \vee x_2$$

$$x_1 \wedge (\bar{x}_1 \vee x_2) = x_1 \wedge x_2$$

Vorrangregeln:

In algebraischer Schreibweise werden ohne Klammersetzung die Verknüpfungen in folgender Reihenfolge vorgenommen:

- 1) Negation,
- 2) UND (Konjunktion) und
- 3) ODER (Disjunktion).

Bei der Anwendung formaler Sprachen wie VHDL sind diese Vorrangregeln mitunter abweichend umgesetzt. Daher sollte man bei mehrfachen logischen Verknüpfungen immer mit Klammersetzung arbeiten.

4.2.4 Boole'sche Gleichungen und Logikgatter

Sowohl die in den *Boole'schen* Gleichungen benutzten Variablen als auch die Verknüpfungsoperatoren müssen in der Digitaltechnik praktische Entsprechungen finden.

Technisch werden *Boole'sche* Variablen durch binäre Signale dargestellt. Die technische Realisierung eines logischen Operators bezeichnet man als **Logikgatter**.

Wie bereits erwähnt, kann man für die Verknüpfung von zwei binären Eingangssignalen 16 verschiedene Funktionen finden. Davon sind die für die Praxis wichtigsten in Bild 4.5 zusammengestellt.

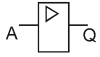
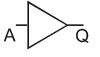
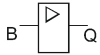
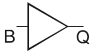
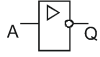
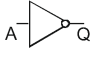
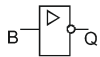
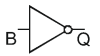
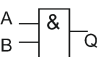
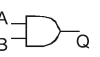
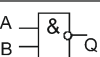
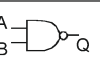
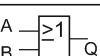

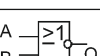
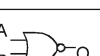
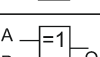
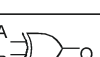
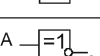
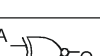
Kürzel	Funktionsbezeichnung	Boole'scher Ausdruck	VHDL-Notation	Europ. Schaltsymbol	US-Schaltsymbol
0	Konstante 0	$Q = 0$	$Q \leq '0'$		
— Entspricht einer direkten Verbindung mit GND bzw. V_{SS} —					
1	Konstante 1	$Q = 1$	$Q \leq '1'$		
A	Identität A	$Q = A$	$Q \leq A$		
— Diese Funktionen werden für Treiberzwecke verwendet —					
B	Identität B	$Q = B$	$Q \leq B$		
\bar{A}	Negation von A	$Q = \bar{A}$	$Q \leq \text{not } A$		
\bar{B}	Negation von B	$Q = \bar{B}$	$Q \leq \text{not } B$		
AND	Logisches UND	$Q = A \wedge B$ $Q = AB$	$Q \leq A \text{ and } B$		
NAND	Negiertes UND	$Q = \overline{A \wedge B}$ $Q = \overline{AB}$	$Q \leq A \text{ nand } B$		
OR	Logisches ODER	$Q = A \vee B$ $Q = AB$	$Q \leq A \text{ or } B$		
NOR	Negiertes ODER	$Q = \overline{A \vee B}$ $Q = \overline{A+B}$	$Q \leq A \text{ nor } B$		
XOR	Exklusiv ODER, Antivalenz	$Q = A \oplus B$ $Q = A \oplus B$	$Q \leq A \text{ xor } B$		
XNOR	Äqui- valenz	$Q = A \leftrightarrow B$ $Q = A \equiv B$	$Q \leq A \text{ xnor } B$		

Bild 4.5 Übersicht über die wichtigsten Logikfunktionen mit maximal zwei Eingängen

Für die gebräuchlichen Logikgatter hat man Schaltsymbole definiert. Die Benennung der Signale an den Ein- und Ausgangsleitungen kann beliebig erfolgen; in der Übersicht sind die Eingänge mit A und B und der Ausgang mit Q bezeichnet. Da praktische Arbeiten vielfach in einer Hardware-Beschreibungssprache (VHDL) erfolgen, ist diese Notation in Bild 4.5 ebenfalls aufgeführt.

Die logischen Verknüpfungen AND, NAND, OR und NOR sind auch für mehr als zwei Eingänge definiert und technisch realisierbar. Das gilt jedoch nicht für die Funktionen XOR und XNOR.

Die Negation wird durch eine einfache Kreislinie am Ausgang (oder bei Bedarf auch am Eingang) eines Gatters gekennzeichnet.

Anmerkung: Die Bezeichnung XNOR ist im algebraischen Sinne nicht korrekt, weil sie „Exklusiv-NOR“ bedeuten würde. Die NOR-Funktion bringt aber nur für $A = B = '0'$ den Wert $Q = '1'$, da lässt sich nichts weiter ausschließen. Wissenschaftlich korrekt sind die Bezeichnungen „Äquivalenz“ oder „Negiertes XOR“.

■ 4.3 Das Transmissionsgatter

Das Transmissionsgatter ist ein Baustein, der zwei **Knoten** in einem elektrischen Netzwerk oder einer logischen Schaltung durch **Steuerung** wahlweise **verbinden** oder **trennen** kann.

Ein Transmissionsgatter besitzt zwei Signalanschlüsse (hier A und Q) und einen Steuereingang (S) (Bild 4.6). Ist (hier mit $S = '0'$) der Schalter geöffnet, so lässt sich von A her für den Ausgang Q kein bestimmter Signalwert zuweisen. Man benutzt dafür den Signalwert 'Z'. Er steht für einen hohen Wert der Impedanz (komplexer Widerstand Z) am Ausgang Q .

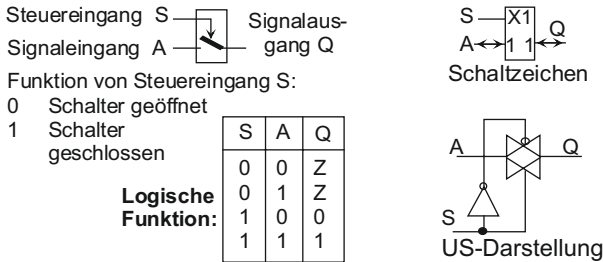


Bild 4.6 Funktionsweise und Darstellung eines Transmissionsgatters

Anmerkung: Ein Vertauschen von Signalein- und -ausgang ist aufgrund der Symmetrie des Schalters zulässig. Ferner erlaubt das Transmissionsgatter auch das Schalten analoger Signale.

Ein Transmissionsgatter kann verwendet werden, um mehrere Ausgänge auf einen gemeinsamen Knoten zu führen. Solche Mehrfach-Zuweisungen logischer Werte kön-

nen nach den Regeln der *Boole'schen* Algebra zu Widersprüchen führen. Schaltet man jedoch an den normalen Gatterausgang ein Transmissionsgatter, so erhält man einen so genannten **Tristate-Ausgang**. Bei der Zusammenschaltung mehrerer Tri-state-Ausgänge ist zu beachten, dass höchstens ein Ausgang Q_i aktiviert sein sollte. Von Bedeutung ist diese Zusammenschaltung für den Aufbau von Bussystemen.

VHDL definiert mit dem Signaltyp `std_logic` gegenüber der *Boole'schen* Algebra weitere Logikwerte. Der Wert 'Z' bezeichnet einen hochohmigen (inaktiven) Ausgang. Ein weiterer Ausgang kann an denselben Knoten eine '0' oder eine '1' liefern. Sind jedoch auf demselben Knoten zwei aktive Ausgänge entgegengesetzt ('0' und '1') belegt, liefert der Signaltyp `std_logic` mit seiner Lösungsfunktion den unbestimmten Logikwert 'X'.

■ 4.4 Kombinatorische Schaltungen

4.4.1 Allgemeines

Das Verhalten logischer Schaltungen lässt sich beschreiben durch:

- **Schaltbelegungs- oder Wahrheitstabelle:** Zusammenfassung aller 2^n möglichen Kombinationen der n Eingangsvariablen x_i und tabellarische Zuordnung der Ausgangssignale.
- **Schaltfunktion:** Darstellung aller Signale als Variablen und aller Funktionen $y_j = f_k(x_i)$ als *Boole'sche* Gleichungen oder in einer Hardware-Beschreibungssprache.
- **Logikplan:** Grafische Darstellung der Funktionen durch Gatter (z. B. NAND, NOR, Negation), Signale durch Verbindungsleitungen.

Die **Schaltbelegungstabelle** erlaubt unvollständig oder vollständig definierte Funktionen. Unvollständigkeit liegt vor, wenn für mindestens eine Kombination der Eingangsvariablen x_i der Wert der Ausgangsvariablen y nicht mit '0' oder '1' vorgegeben ist. Diese Tabellenzeile wird entweder weggelassen, oder man trägt ein Symbol für „beliebig“ (im VHDL-Signaltyp `std_logic` das Zeichen '-') ein.

Ein Logikplan drückt aus, in welcher Weise mehrere Gatter für die logische Verknüpfung von Signalen zusammenwirken. Er repräsentiert eine technische Struktur. Mit einer gegebenen Schaltfunktion können sehr unterschiedliche Logikpläne korrespondieren. Jeder Logikplan bildet eine vollständig definierte Logikfunktion ab, d. h. unvollständig definierte Logikfunktionen müssen vor der Übertragung in einen Logikplan (willkürlich oder nach Minimierungskriterien) vervollständigt werden.

Eine **kombinatorische Schaltung** liefert bei Vorgabe von n binären Eingangsgrößen x_i immer eindeutig daraus bestimmbare Ausgangswerte y_k . Sie besteht aus einer Menge **logischer Verknüpfungen** ohne jegliche Rückkopplung. Das Prinzip Ursache \rightarrow Wirkung gilt dabei ohne Einschränkung.

4.4.2 Optimierung von Schaltfunktionen

Die Gesetze einer wirtschaftlichen Fertigung zwingen die Hersteller von digitalen Schaltkreisen dazu,

- mit einer möglichst geringen Anzahl von Logikgattern und
- mit möglichst wenigen unterschiedlichen Operatoren

auszukommen. Dementsprechend erfolgt Optimierung einer Schaltfunktion in der Praxis in zwei Schritten, die im Folgenden näher erläutert werden.

4.4.2.1 Minimierung einer AND-OR-Schaltfunktion

Ein **Vollkonjunktionsterm** (VK-Term) ist ein logischer Ausdruck, der **alle** vorhandenen Eingangsvariablen x_i entweder direkt oder in negierter Form UND-verknüpft. Die **Kanonisch Disjunktive Normalform** (KDN) einer Schaltfunktion $y(x_i)$ besteht ausschließlich aus einer Menge ODER-verknüpfter VK-Terme.

Bekannte Verfahren zur Minimierung gehen meist von der KDN aus. Die direkte Umwandlung der KDN in einen Logikplan entspricht einer zweistufigen AND-OR-Logik (Abschn. 4.4.6). Bei einer gegebenen Wahrheitstabelle findet man für die Schaltfunktion y eine zeilenweise Korrespondenz zur KDN. Dabei bedeuten:

'1' → Der zugehörige VK-Term ist in der KDN enthalten.

'0' → Der zugehörige VK-Term ist in der KDN nicht enthalten.

'-' → Der zugehörige VK-Term kann in der KDN enthalten sein.

Meist lässt sich der technische Aufwand für die Realisierung einer Logikfunktion gegenüber der KDN wesentlich verringern. Insbesondere ist im Zuge der Minimierung eine nicht vorgegebene Belegung '-' (beliebig, engl. „don't care“) abhängig von den vorgegebenen VK-Termen durch eine '0' oder eine '1' zu ersetzen.

Das **Minimierungsverfahren** von **Karnaugh/Veitch (KV)** geht von einer grafischen Darstellung der KDN bzw. der Wahrheitstabelle aus. Das **KV-Diagramm** wird nach folgenden Regeln aufgestellt:

- Jeder möglichen Zeile der Wahrheitstabelle wird ein Feld im KV-Diagramm zugeordnet. Für n Eingangsvariablen sind also 2^n Felder vorzusehen.
- Die Anordnung der Felder wird so gewählt, dass sich benachbarte Felder immer hinsichtlich genau einer Variablen unterscheiden. Diese Wahl wird durch die Belegung der Eingangsvariablen am Rand des KV-Diagramms notiert.
- Randfelder haben auch die gegenüberliegenden Randfelder als Nachbarn. Für Eckfelder gilt Gleiches im mehrfachen Sinne.
- In jedem Feld wird der Wert der Schaltfunktion y eingetragen.

Die minimierte Schaltfunktion erhält man (falls möglich) durch Verschmelzen von benachbarten mit '1' belegten Feldern. Man erhält damit zunächst Zweier-Blöcke, die in der Schaltfunktion zwei VK-Terme durch einen verkürzten Ausdruck ersetzen. Im Weiteren lassen sich gegebenenfalls zwei benachbarte Zweier-Blöcke zu einem Vierer-Block zusammenfassen.

rer-Block oder zwei benachbarte Vierer-Blöcke zu einem Achter-Block verschmelzen usw. Es sind also möglichst große 2^i -Blöcke so zu bilden, dass sich jeder 2^i -Block in der vereinfachten Schaltfunktion durch einen verkürzten Konjunktionsterm beschreiben lässt. Dabei dürfen

- mit '1' belegte Felder auch mehrfach verschmolzen und
- mit '-' belegte Felder bei Bedarf wie eine '1' benutzt werden.

Im Beispiel nach Bild 4.7 sei eine Wahrheitstabelle mit vier Eingangsvariablen vorgegeben. Daraus werde die minimierte Schaltfunktion ermittelt.

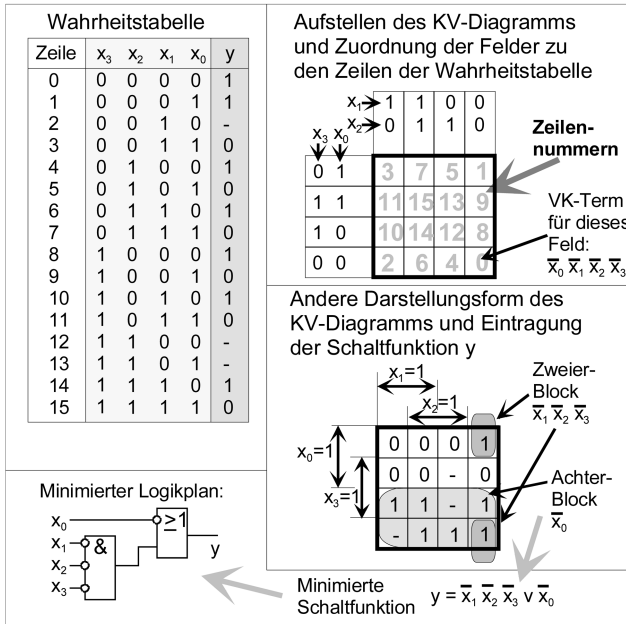


Bild 4.7 Beispiel für die Minimierung einer Schaltfunktion

Im Beispiel ergibt sich nach der Minimierung in der Wahrheitstabelle der Wert '1' in den Zeilen 2 und 12, während in der Zeile 13 '-' durch '0' zu ersetzen ist.

Die Minimierung mit Hilfe des KV-Diagramms wird bei mehr als sechs Eingangsvariablen x_i grafisch sehr unübersichtlich. Für eine höhere Anzahl von Variablen werden algorithmische Verfahren (z. B. Quine/Mc.Cluskey) maschinell abgearbeitet. Sie basieren zumeist - wie die Minimierung mit Hilfe des KV-Diagramms - auf dem Auffinden und Verschmelzen von „benachbarten“ Konjunktionstermen.

4.4.2.2 Realisierung auf Gatterniveau

Im zweiten Arbeitsschritt wird auf die Frage eingegangen, welche Gatterfunktionen für die technische Umsetzung zu benutzen sind.

Ein Operatorensystem ist **vollständig**, wenn sich mithilfe der darin enthaltenen Verknüpfungsoperationen jede beliebige logische Funktion nachbilden lässt.

Die Operationen {AND, OR, NOT} sind Grundfunktionen der *Boole'schen* Algebra. Mit ihnen lassen sich alle 16 möglichen Schaltfunktionen zweier Eingangsvariablen A und B vollständig abbilden. Es lässt sich zeigen, dass die folgenden Gruppen ebenfalls vollständige Operatorensysteme darstellen:

{NAND}; {NOR}; {AND, XOR}.

Die Herstellung einer Logik wird meist preiswerter, wenn nur eine Art von Logikgattern verwendet wird. Will man beispielsweise ausschließlich NAND-Gatter verwenden, lässt sich aus dem Beispiel nach Bild 4.7 das Ergebnis in Bild 4.8 ableiten.

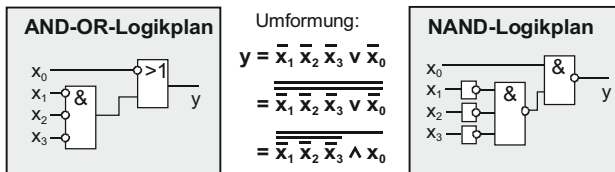


Bild 4.8 Ergebnis der Beispielfunktion in NAND-Technik

4.4.2.3 Aktuelle Aspekte

Beim effektiven Entwurf digitaler Schaltungen mit mehreren Tausend oder Millionen Gatterfunktionen kann man auf ein CAD-System (Computer Aided Design) nicht verzichten. Die darin implementierten Arbeitsmethoden sind äquivalent zur klassischen Vorgehensweise. Alle Informationen werden hierbei in Dateien abgelegt und es gelten folgende Korrespondenzen:

- **Schalbelegungstabellen** ↔ **Funktionstabellen** (z. B. JEDEC-Datei).
- **Boole'sche Gleichungen** ↔ **Operatoren** in einer **Hardware-Beschreibungssprache** (z. B. VHDL).
- **Logikpläne** ↔ **Netzlisten** (z. B. .net oder .edf).

Die Umformungen zwischen den verschiedenen Darstellungen laufen schrittweise nach algorithmisch zu bearbeitenden Regeln ab. Zur Eingabe von Logikplänen verwendet man grafische Oberflächen. Hardware-Beschreibungssprachen wie VHDL hingegen gestatten neben Zustands- oder Flussgrafiken auch die direkte Eingabe im Quelltextformat. Dabei gelten folgende Regeln:

- Man arbeitet **hierarchisch** auf mehreren Komplexitätsebenen.

Sachwortverzeichnis

Symbole

2-aus-5-Code 145
λ-Sonde 312

A

Abstandsmessung 293, 297
Abstandssensor 303, 305
Abstimmung 266
Abtastregelkreis 104
Abtastregler 104
Abtastzeit 104, 106
ADC (Analog Digital Converter) 416
Addierer 148
Adressierungsart 409
A/D-Umsetzung 113
Ähnlichkeit, physikalische 193
Ähnlichkeitsmodell 193
Aiken-Code 145
Aktor
- elektrischer 315
- hydraulischer 349
Algorithmen 390
Alphabet 383
ALU (Arithmetic Logic Unit) 414
Amplitudengang 94, 277
Amplitudenspektrum 219
Analog/Digital-Umsetzer 274
Analog/Digital-Wandler 104
Analogie
- mathematische 193
- physikalische 193
Analogrechenschaltungen 125
Analogrechner 125
Analogtechnik 112
Anfangswert 76
Anpassschaltung 272
Anregelzeit 48
Antiblockiersystem (ABS) 451
Antivalenz 136
Antrieb
- hydraulischer 365
- pneumatischer 367

Antriebsschlupfregelung (ASR) 452
Antriebstechnik 100
Anwendungsprogramm 382
Anzeigecodierungen 145
aperiodisch 71
Äquivalenz 136
Äquivalenzumformung 65f.
Arbeitsbereich 273
Arbeitsplatzrechner 405
Arbeitspunkt 53, 84, 114
Arbeitssatz 244, 249
Array-Prinzip 150
ASIC (Anwenderspezifische Integrierte Schaltkreise) 170
Assembler-Sprachen 395
Assoziativgesetz 137
Asynchronmaschine 343
Auflösung 274
Aufnehmer 272
Ausdruck 391
Ausflussfunktion 372
Ausführungseinheit 415
Ausgangswiderstand 121
Ausgleichzeit 69
Ausnahmebehandlung 398
Ausregelzeit 48
Aussagenlogik 135
Ausschaltzeit 178
Aussteuergrad 180
Auswahlprinzip 146
Automatisierungstechnik 278
Axialkolbenpumpe 351

B

Bandbreite-Verstärkungsprodukt 119
Barrel-Shifter 423
Basisschaltung 114
Baum 393
BCD-Code 388
Befehlsformat 410
Befehlssatz 422
Befehlssatzarchitektur 408

Befehlssteuerung 402
 Befehlszeiger 407
 Befehlszustand 400
 Beobachtbarkeit 82
 Beobachtungsnormalform (BNF) 61
 Beschleunigung 306
 Beschleunigungssensor 281, 306
 Bestrahlungsstärke 284
 Betragsoptimum 100
 Bildfunktion 57
 Binder 395, 399
 BioFET 313
 Bipolartransistor 113, 172, 175
 Bit 384
 Black-Box-Beschreibung 49
 Black-Box-Modell 190
 Blende 307
 Block 199
 Blöcke, nichtlineare 56
 Blockschaltbild 43, 199
 Blocktaktung 184
 Bode-Diagramm 94, 277
 Bondgraf 216
 Boole'sche Algebra 135
 Boole'sche Gleichungen 137
 Bussystem 401
 Byte 385

C

Cache 412
 CAN-Elektronik 440
 CISC (Complex Instruction Set
 Computer) 411
 CMOS-Bausteine 165
 CMOS-Technik 134
 Code, einschrittiger 300
 Codierer 144
 Codierung

- kombinatorische 145

 Compiler 395

- integrierter 399

 Computer 404
 Computerprogramm 404
 Computersimulation 190
 Computersystem 382
 conditional execution 424
 Cortex-M3 421
 CPLD (Complex Programmable Logic
 Devices) 167

D

DA 104
 DAC (Digital Analog Converter) 416
 Dämpfung, optimale 270
 Dämpfungsgrad 78
 D-Anteil 88
 Datei 394
 Daten 383
 Datenbreite 416
 Datenstrukturen 393
 Datentypen

- elementare 397
- zusammengesetzte 397

 Datenübertragungsrichtung 416
 Datenzustand 400
 D/A-Umsetzung 113
 Debugger, integrierter 399
 Decode 413
 Decoder 144
 Dehnungsmessstreifen 287, 304
 Dekodierung 408
 Dekrementieren 410
 Demultiplexer 147
 Denavit-Hartenberg-Notation 237
 Derivat 419
 Determinante 26
 D-Flipflop 155
 D-Glied 63
 Dickenmessung 293
 Dickschichttechnologie 279
 Dielektrizitätseffekt 292
 Differenzgleichung 104
 Differenzialgleichung 57
 Differenziationsregel 58
 Differenzierer 63
 Differenzierglieder 129
 Differenzverstärker 115
 Differenzverstärkung 121
 Digital/Analog-Umsetzung 113
 Digital/Analog-Wandler 104
 Digitale Signalprozessoren (DSP) 420
 Digitalrechner 404
 Digitalregler 104
 Digitaltechnik 132
 Disjunktion 136
 Distributivgesetz 137
 Dividierer 150
 Division, analoge 129
 DMS 287, 304
 Doppler-Effekt 303
 Drallsatz 214

DRAM 412
 Drehimpulssatz 244, 247
 Drehzahlregelkreis 317
 Drehzahlregler 322
 Dreibein, lokales 227
 Drei-Excess-Code 145
 Dreipunktregler 90
 Druck 304
 - statischer 307, 308
 Druckdifferenz 307
 Druckmessung 301
 Dual-Ported-RAM 420
 Dünnschichttechnologie 279
 Durchfluss 307
 Durchflussbeiwert 371
 Durchtrittskreisfrequenz 95
 Düse 307
 Dynamik 48

E

Echtzeitfähigkeit 405
 ECL-Bausteine 165
 Editor, kontextsensitiver 399
 Effekt
 - elektrochemischer 285
 - elektrodynamischer 282
 - fotoelektrischer 283
 - magnetoelastischer 305
 - piezoelektrischer 281
 - piezoresistiver 287
 Eigenkreisfrequenz 72
 Eigenvektor 29
 Eigenwert 29, 81, 108, 109
 - vorgegebener 111
 Ein-/Ausgabereinheit 400
 Eingabeunterstützung,
 kontextsensitive 399
 Eingangsruehstrom 121
 Eingrößensystem 45, 52
 Einheit, imaginäre 19
 Einheitssprung 46, 276
 Einschaltzeit 178
 Einschwingen, aperiodisches 93
 Einschwingverhalten 108
 Einschwingzeit 69, 77
 Einstellregeln 97
 Einstellung nach Kessler 101
 Einstellung nach Ziegler-Nichols 98
 Elektrometerverstärker 124
 Elementarglieder, lineare 62

Embedded PC 417
 Embedded systems 405
 Emissionsgrad 312
 Emitterschaltung 113, 114
 Empfindlichkeit, spektrale 284
 Endwert 76
 Energie 206
 Energiesatz 245, 250
 Energiespeicher 52
 ENFET 313
 Entkopplungsmodell 348
 Entwicklungswerkzeug 399
 Entwurf 394
 - quasikontinuierlicher 105
 Ersatzmodell, physikalisches 50
 ESP (Elektronisches Stabilitäts-
 Programm) 453
 Euler'sche Formel 21
 Euler-Winkel 234
 Execute 413
 Exponentialglieder 130

F

Faltung 74
 Feedback control 45
 Feedforward control 45
 Fehler 275
 Feldeffekttransistor 113
 - ionensensitiver 313
 Feldplatte 290
 Fermi-Niveau 284
 Fertigung, flexible 278
 Festpunktmethode 275
 Festpunktzahlen 388
 Festwertregelung 46
 Festwertspeicher 151
 Fetch 413
 Feuchtemessung 294
 Feuchtesensor 294
 Finite-Elemente-Modell 225
 Firmware 382, 418
 Flipflops 152
 Floating-Gate-Transistoren 166
 Flügelzellenpumpe 351
 Flussvariable 216
 Folgeregelung 46
 Förster-Sonde 310
 Fotoelement 284
 Fotovoltaik 284
 Fotowiderstand 288

Fourier-Koeffizienten 38
Fourier-Reihen 38
Fourier-Transformation 37
- diskrete 219
FPGA (Field Programmable Gate Array) 168
FPU (Floating Point Unit) 414
Freiheitsgrad, dynamischer 59
Freilaufdioden 173
Frequenzanalyse 219
Frequenzbereich 306
Frequenzgang 37, 119, 277
Frequenzgangsentwurf 94
Frequenzkennlinien 94
Führungsfilter 102
Führungsfrequenzgang 95
Führungsübergangsfunktion 46, 47
Führungsübertragungsfunktion 91
Führungsverhalten 46
Füllstand 301
Füllstandsmessung 292, 298
- kapazitive 296
- radioaktive 301
Füllstandssensor, kapazitiver 301
Funktion 279
Funktionalbeziehung 50
- linearisierte 55
Funktionsüberprüfung 279

G

Gain 276
Gasdetektor 291
Gate-Turn-Off-Thyristor (GTO) 172
Gegenkopplung 41, 64, 122, 123
Gegentakteingangswiderstand 121
Genauigkeit, stationäre 85
Gesamtübertragungsfunktion 65
Geschwindigkeit 303
Gewichtsfunktion 74
Gleichstrommaschine 316
Gleichtakteingangswiderstand 121
Gleichtaktunterdrückung 121
Gleichtaktverstärkung 120f.
Gleichung
- charakteristische 92
- Nernst'sche 285
Gleitpunktzahlen 389
Graf 393
Gray-Code 300, 388
Grenzfall, aperiodischer 71
Grenzfrequenz 278

Grenzverstärkung 93
Grenzwertschalter 290, 301
Grenzyklus, nichtlinearer 89
Grundverfahren 280
Grundverhalten
- dynamisches 69
Gütekriterien 48

H

Halbadder 148
Halbschrittbetrieb 339
Hall-Generator 309
Hall-Sensor 448
Hall-Sonde 309
Hall-Spannung 309
Hardware 382
Harvard-Architektur 406
Hauptspeicher 400, 401
Hazards 413
Heißeleiter 289
Hilfe, kontextsensitive 399
Hitzdraht 308
Hochfrequenzschaltung 113
Hochlaufgeber 323
Homogenität 53
Hubmagnet 332
Hydraulik-Motor 349, 355
Hydraulik-Zylinder 355
Hyper-Threading 429
Hysterese 88
Hysteresefehler 276

I

I-Glied 63
Imaginärteil 19
Impedanzwandler 125
Implementierung 394
Impulssatz 213, 241
Impulsvektor 241
Impulszählung 303
Induktionsgesetz 282, 309
Informatik 382
Inkrement 299, 410
Instanzen 398
Instrumentenverstärker 127
Insulated-Gate-Bipolartransistor (IGBT) 172, 175
Integration 30, 51
Integrierer 63
Integrierglieder 129

Intel Core i7 425
 Intensitätsgröße 207
 Interface 398, 402
 Interpreter 395
 Interruptsteuerung 402
 Inverter 134
 Ionenkonzentration 285
 ISA, Instruction Set Architecture 408
 ISFET 313
 Istwert 275

J

JFET 113
 JK-Flipflop 156
 Jordan'sche Normalform (JNF) 61, 81

K

Kaltleiter 289
 Kanonisch Disjunktive Normalform (KDN) 141
 Kapazität eines Kondensators 292
 Karnaugh/Veitch (KV) 141
 Kaskadenregelung 103
 Kenngröße 274
 Kennkreisfrequenz 72
 Kippfunktion 156
 Klassen 397
 Knotenregel 203, 215
 Kolbenfläche 365
 Kolbenweg 361
 Kollektorgleichstrom 114
 Kollektorschaltung 114
 Kollisionsüberwachung 298
 Kommutativgesetz 137
 Komparator 149
 Konfigurationsdaten 170
 Konjunktion 136
 Konstante 391
 Konstantpumpen 350
 Kontaktspannung 284
 Kontaktthermometrie 288
 Kontinuum 225
 Kontrollstrukturen 397
 Konzentration 312
 Körper, starre 224
 Korrelation 304
 Korrelationsverfahren 303
 Kraft 304
 Kraftsensor, dynamischer 281
 Kreisfrequenz 78

Kreis, offener 94
 Kreuzkorrelation 304
 Kronecker-Symbol 232
 Kurzkennzeichnung 73
 Kurzschlussstrom 284
 KV-Diagramm 141
 Kybernetik 42

L

Lader 395
 Ladungsverstärker 281
 Lageregelung 362
 Lagrange'sche Gleichungen 2. Art 254
 Laplace-Rücktransformierte 74
 Laplace-Transformation 31, 197
 Laplace-Transformierte 57
 Laptop 404
 Laserinterferometer 303
 Laufzeitmessung 296
 Leerlaufspannung 284
 Leistungsdiode 171
 Leistungselektronik 171
 Leistungsspektrum 219
 Leitplastik-Potenziometer 364
 Lichtleiter 301
 Lichtschranke 303
 Lichttaster 297
 Linearisierung 55, 276
 Linearität 53
 Linearitätsfehler 276
 Linear-Variable-Differenzial-Transformator (LVDT) 295
 Linux 419
 Listen, verkettete 393
 Load/Store-Units 414
 Logarithmierglieder 130
 Logikdefinitionen 133
 Logikfunktionen 133
 Logikgatter 137
 Logikpegel 132
 Logikplan 140
 Look-Up-Table (LUT) 151
 Lorentz-Kraft 290, 309
 LUT 151
 LVDT 295
 LZI-System 57

M

MAC-Operation (Multiply-Accumulate) 420
 MacroOp-Fusion 426

Magnetfeld 309
 magnetoelastisch 305
 Magnetostriktion 298
 Mainframes 404
 Maschenregel 203, 215
 Maschinensprache 395
 Maschinenwort 384
 Maßeinheit 273
 Massendurchfluss 308
 Massenpunkt 224
 Massenträgheitsmoment 247
 Master-Slave-Flipflop 155
 Matrix, Inverse 27
 Matrizen 22
 Mealy-Automat 162
 Mechanische Güte 263
 Mehrfach-Subtrahierverstärker 127
 Mehrfach-Summationsverstärker 126
 Mehrgrößensystem 45, 52, 59, 68
 Mehrkörpersystem 225
 Memory-Mapped-IO 415
 Messbereich 274
 Messbereichsendwert 275
 Messeinrichtung 44
 Messfühler 272
 Messgeber 272
 Messgenauigkeit 275
 Messgröße 273
 Messverfahren 272
 Messwert 273
 Messwertaufnehmer 279
 Michelson-Interferometer 299
 Mikroarchitektur 408, 426
 Mikrocontroller (μC) 104, 403, 405, 418
 Mikrofon 282
 Mikroprozessor 104, 404
 Mikrorechentchnik 404
 Mikrorechner 404
 MIMO 45
 MIMO-System 52
 Minimierungsverfahren 141
 Mitkopplung 64, 122
 MMX (Multi Media Extension) 415
 Modell 189
 - analytisches 190
 Modellabgleich 51
 Modellansatz 49
 Modellbildung 49, 189
 Modellelemente 199
 Modellklassen 194
 Modellordnung 49

Modellparameter 50
 Modellstruktur 219
 Modellverifikation 51
 Modultestspezifikation 436
 Moore-Automat 161
 MOS-Feldeffekt-Leistungstransistor
 (MOS-FET) 172
 MOSFET 113, 175
 Multikernprozessoren 415
 multiple input – multiple output 45, 52
 Multiplexer 146
 Multiplikationszelle 151
 Multiplizierer 150
 - analoger 129

N

Nachstellzeit 86
 Näherungsschalter 292, 293, 295, 297
 Negator 134
 Nennernullstelle 74
 Nernst'sche Gleichung 285
 Netzliste 144
 Newton'sche Axiome 201
 Next-state-logic 161
 Notationen 390
 NTC-Thermistor 289
 Nullpunktfehler 276

O

Offset 276
 Offsetspannung 120, 121
 Ölfedersteifigkeit 361
 Online-Dokumentation 399
 Operand 391
 Operationscode 408
 Operationsverstärker 117
 Operator 391
 - binärer 397
 - unärer 397
 Optimum, symmetrisches 100
 OPV 117
 - Grundsaltungen des 122
 - Kennwerte realer 121
 Originalfunktion 57

P

Parallelschaltung 63
 Parameteridentifikation 206, 221
 Parameter, physikalischer 51

Parametervektor 109
 periodisch 71
 Peripheriebausteine 415
 Personal Computer 404
 Pfeil 199
 P-Glied 63
 Phasendiagramm 264
 Phasenfrequenzgang 37
 Phasengang 94, 277
 Phasenreserve 95, 97
 Phasenspektrum 219
 Phasenverschiebung 263
 Phasenwinkel 268
 PID-Regler 86, 105
 piezoelektrisch 306
 Piezoelektrischer Effekt 281
 Piezo-Inline-Injektor 445
 Pilotmodell 193
 Pipelining 413
 PI-Regler 85
 Planck'sches Strahlungsgesetz 311
 Pneumatikmotor 367
 Pneumatik-Ventil 371
 Pneumatikzylinder 380
 Pol
 - konjugiert komplexer 78
 - reeller 78
 Polling-Steuerung 402
 Pol-/Nullstellenplan 80
 Polpaar, dominantes konjugiert
 komplexes 78
 Polvorgabe 111
 Polvorgaberegler 108
 Positionierantrieb 323
 Positionsbestimmung
 - absolute 296
 - inkrementale 296
 - magneto-restriktive 301
 Positionserfassung 298
 Positionsmessung 295, 300, 303
 Potenzialdifferenz 284
 Potenzialvariable 216
 Potenziometer 286
 Präprozessor 395
 P-Regler 83
 Pressduktor 305
 Produktivitätssteigerung 278
 Programm 394
 Programmablaufplan 390
 Programmdateien 383
 Programmierbare Logikbausteine (PLD) 166

Programmiermodell 409, 423
 Programmiersprachen 394
 - höhere 395
 Programmierung 390
 - objektorientierte 397
 - prozedurale 396
 Projektverwaltung 399
 Proportionalbeiwert 83
 Proportionalventil 352
 Prototyp 193
 Prozess 189
 Prozessor 404
 Prozessor-Modi 425
 Prozesszustand 45
 Pseudocode 390
 P-T1-Verhalten 70
 P-T2-Verhalten 71
 PTC-Thermistor 290
 PTC-Widerstand 301
 P-Tn-Verhalten 73
 Pulsbreitenmodulation (PBM) 184
 Pulsperiode 178
 P-Variable 207
 Pyrometer 311, 312

Q

Qualitätssicherung 278
 Quantitätsgröße 207
 Querempfindlichkeit 273
 Queue (Warteschlange) 393

R

Raumzeiger 186, 324
 Raumzeigertransformation 186
 Reaktionsgeschwindigkeit 284
 Realteil 19
 Recheneinheit, zentrale 400
 Rechenwerk 400f.
 Rechnerarchitektur 406
 Referenzpunkt 300
 Regelalgorithmus 104
 Regeldifferenz, bleibende 47
 Regeleinrichtung 43
 Regelgesetz 107
 Regelglied 44
 Regelgüte 48
 Regelkreisstruktur, erweiterte 102
 Regelstrecke 49, 68
 Regelung 45, 364
 Regelungsnormalform (RNF) 61

Regelungspol 92
 Regelungssysteme 41
 Regelungstechnik 41
 Regelverhalten 93
 Register 158, 161
 Register Transfer Entwurf 161
 Register Transfer Level 161
 Regler 83

- adaptiver 105
- diskreter 104
- instabiler 93
- kontinuierlicher 105
- modellgestützter 105

 Reglerverstärkung 97

- kleine 93

 Reihung 392
 Resonanzüberhöhung 96
 Ressourcen-Editor 399
 Restabweichung 69
 Reversierende Strecke 70
 RISC-Architektur (Reduced Instruction Set Computer) 411
 Robotertechnik 278
 Rotation 233
 RS-Flipflop 152
 Rücktransformation 59

S

Sättigungskernsonde 310
 Schaltbelegungstabelle 140
 Schalterlogik 132, 135
 Schaltfunktion 140
 Schaltnetz 413
 Schaltregler 88
 Schaltungen, kombinatorische 140
 Schaltungen vor der Analog-Digital-Umsetzung 113
 Schieberegister 159
 Schmitt-Trigger 122
 Schnittprinzip 214
 Schnittstelle 279, 398, 402
 Schrägscheibe 351
 Schrittmotor 336
 Schwebkörper 307
 Schwerpunktsatz 246
 Schwimmer 301
 Schwimmer-Methode 301
 Schwingabelsensor 301, 302
 Schwingung 71, 93

- erzwungene 265

 Schwingungsdauer 263
 Schwingungsversuch 98
 Seebeck-Effekt 284
 Semantik 394
 Sensor 272

- aktiver 280
- direkt umsetzender 281
- faseroptischer 279
- indirekt umsetzender 296
- integrierter 272
- intelligenter 273
- passiver induktiver 295
- passiver kapazitiver 291
- passiver resistiver 286
- potenziometrischer 286, 296
- smarter 273

 Sensorelement 272
 Serienschaltung 63
 Server 405
 Servoventil 352, 353
 Shannon'sches Theorem 136
 SI 273
 Sicherheitsanforderung 279
 Signal 199

- binäres 132

 Signalaufbereitung 279
 Signalflussbild 199
 SIMD 415
 Simpson'sche Formel 30
 Simulation 190
 single input - single output 45, 52
 Single Instruction, Multiple Data 415
 SISO-System 45, 52
 Si-Technologie 279
 Skalares Produkt 25
 Skalar-Prozessoren 414
 Software 382
 Softwareanalyse 437
 Software-Anforderungs-Analyse 436
 Softwareentwicklung 390, 394
 Software-Pflichtenheft 436
 Softwaretechnik 394
 Solarzelle 284
 Sollwert 275
 Spannungsfolger 125
 Spannungsinduktion 307
 SPLD (Simple Programmable Logic Devices) 166
 Sprachen, anwendungsorientierte 395
 Sprungantwort 46, 199, 276
 Sprungantwortmessung 98

- Sprungfunktionen 46
 SRAM 412
 SSE (Streaming SIMD Extensions) 415
 stabil 70
 Stabilität 47, 75
 Stabilitätskriterium nach Nyquist 75, 96
 Stack (Stapel) 393, 410
 Standardregelkreis 44
 Standardregler, linearer 91
 state machine 161
 Stauscheibe 307
 Steilheit 114
 Steilheitsmultiplizierer 129
 Stelleinrichtung 316
 Steller 44
 Stellglied 44
 Stellgröße 42, 49
 Stellkräfte 367
 Steuerbarkeit 82
 Steuereinheit 415
 Steuerung 45, 364
 Steuerungsdaten 383
 Steuerwerk 400, 401
 Steuerungse 354
 Störgröße 49
 Störübergangsfunktion 46
 Störübertragungsfunktion 91
 Störung 44
 Störverhalten 46
 Strahlungsleistung 283, 311
 Strecke 44
 - instabile 93
 - mit Ausgleich (stabil) 70
 - ohne Ausgleich (instabil) 70
 Streckenverhalten 79
 Streckenverstärkung 99
 Stromregler 317, 330
 Stromrichter
 - netzgeführte 174
 - selbstgeführte 174, 176
 Strömungsgeschwindigkeit 307
 Strukturbild 43
 Strukturblock 198
 Strukturmodell 190, 194
 Subtrahierer 149
 Subtrahierverstärker 125
 Summationsverstärker 125
 Summenzeitkonstante 99
 Superpositionsprinzip 53, 91
 Superskalar 414
 Syntax 394
 Synthese, vollständige modale 108
 System 189
 - eingebettetes 405, 417
 - lineares 57
 - statisches 195
 - zeitinvariantes 57
 Systemanalyse 206
 Systembus 401
 Systemidentifikation 206
 Systemsoftware 382
 Systemtheorie 41, 206
- T**
- Tablet 404
 Tachogenerator 283, 303
 - bürstenloser 283
 Taguchi-Gassensor 291
 Taktung
 - alternierende 181
 - gleichzeitige 180
 Tauchspulenmikrofon 282
 Taumelscheibe 351
 Taylor-Reihe 54, 275
 Teiler 159
 Temperatur 311
 Tempomat 42
 Test 394
 Testsignale 218
 T-Flipflop 156
 Theorie ereignisdiskreter Systeme 45
 Thermistor 289
 Thermoelement 284
 Thermopaar 284
 Thermospannung 285
 Thermostat 88
 Thyristor 171
 Tiefsetzsteller 176
 Timer/Counter 415
 Tiny-Logic-Bausteine 166
 Toleranzbandmethode 275
 Torque-Motor 354
 Totzeit 63
 Totzeitglied 330
 Trägheitsprinzip 201
 Transducer 272
 Transistor 173
 Transitfrequenz 119, 121
 Translation 233
 Transmissionsgatter 139
 Transmissionsgrad 312

Triangulation 296
Triangulationsverfahren 296
Tristate-Ausgang 140
Tt-Glied 63
TTL-Baureihe 165
T-Variable 207

U

Übergang 78
Übergangsfunktion 157, 276
Übergangslgik 161
Übergangsverhalten 77
Überlagerungsprinzip 53
Überschwingen 80
Überschwingweite 48
Übertragungsfunktion 57, 59, 74, 91, 197
Übertragungsmatrix 59
Übertragungsmedium 416
Übertragungsprotokoll 416
Übertragungsverhalten 52, 194
- dynamisches 275
- statisches 275
Ubiquitous Computing 404
Ultraschall 297
Ultraschall-Abstandssensor 301
Ultraschallsignal 303
Umgebungsbedingung 279
Umkehrverstärker 123
Umsetzverfahren, indirektes 280
Universalprozessor 417

V

Variable 391
- komplexe 58
Vektorprodukt 25
Vektorrechnung 24
Ventil 352
Verarbeitungsdaten 383
Verarbeitungseinheit, zentrale 404
Verbesserung, dynamische 86
Verbund 392
Verengung 307
Vererbung 398
Vergleichsstelle 44
Vergrößerungsfunktion 268
Verhalten
- aperiodisches 78
- dynamisches 276
- instabiles 72
Verifikation 394

Verstärker
- invertierender 122
- nichtinvertierender 124
Verstärkergrundsaltung 113
Verstärkung 112, 330
- proportionale 51, 63
- stationäre 70
Verstärkungs-Bandbreite-Produkt 121
Verstärkungsfehler 276
Verstärkungsprinzip 53
Verzugszeit 69
Vierquadrantensteller 179
Volladder 148
Vollkonjunktionsterm (VK-Term) 141
Vollpolsynchronmaschine 328
Vollschrittbetrieb 339
Von-Neumann-Architektur 406
Von-Neumann-Rechnerkonzept 400
Vorhaltzeit 87

W

Wahrheitstabelle 140
Wandler 272
Wärmekapazität 308
Wärmeumsatz 308
Wärmeverlustverfahren 308
Wechselstromkopplung 114
Wegaufnehmer, induktiver 364
Wegmessung 303
Werkstoffprüfung 297
wertdiskret 104
Wheatston'sche Brücke 287
Widerstandsthermometer 288
Wirbelstrom-Potenzimeter 364
Wirkungslinien 43
Wirkungsplan 42, 51, 55
Wirtschaftlichkeit 279
WOK 92
Wort 384
Write Back 413
Wurzelortskurve 92

Z

Zahlencodierungen 144
Zahlen, komplexe 19
Zahlensysteme 385
Zähler 159
Zählernullstelle 74, 79
Zahl, konjugiert komplexe 20
Zahneingriff 350

-
- Zahnlücken 350
Zahnradpumpe 350
Zeichen, alphanumerische 387
Zeichenfolgen 383
Zeichensatz 383
Zeigervariable 393, 397
zeitdiskret 104
Zeitfunktion 57
Zeitinvarianz 52
Zeitkonstante 70
Zeitkonstantenform 100
Zeitverhalten 69
Ziffern 387
Z-Transformation 104
Zündstartschalter, elektronischer 430
Zuordnungsvorschrift 386
Zustandsbeobachter 110
Zustandsdifferenzialgleichung 60
Zustandsgleichungen 60
Zustandsmaschine 161
Zustandsraum 59, 81
Zustandsraumdarstellung 59, 60, 81
Zustandsregelung 107
Zustandsregler 106
Zustandsspeicher 161
Zustand, transformierter 60
Zuverlässigkeit 279
Zuweisung 392
Zweierkomplement 149
Zweimassenschwinger 67
Zweipunktregler 88