

# Taschenbuch der Mechatronik

Bearbeitet von  
Ekbert Hering, Heinrich Steinhart

2., überarbeitete Auflage 2015. Buch. 469 S. Hardcover

ISBN 978 3 446 43857 6

Format (B x L): 16,2 x 21,6 cm

Gewicht: 766 g

[Weitere Fachgebiete > Technik > Maschinenbau Allgemein > Mechatronik, Mikrosysteme \(MEMS\)](#)

schnell und portofrei erhältlich bei

**beck-shop.de**  
DIE FACHBUCHHANDLUNG

Die Online-Fachbuchhandlung [beck-shop.de](http://beck-shop.de) ist spezialisiert auf Fachbücher, insbesondere Recht, Steuern und Wirtschaft. Im Sortiment finden Sie alle Medien (Bücher, Zeitschriften, CDs, eBooks, etc.) aller Verlage. Ergänzt wird das Programm durch Services wie Neuerscheinungsdienst oder Zusammenstellungen von Büchern zu Sonderpreisen. Der Shop führt mehr als 8 Millionen Produkte.



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
<b>1</b> Mathematik .....	<b>19</b>
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 .....

2.1	Regelssysteme .....	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 <sub>1</sub> -Verhalten .....	70
2.3.1.3	P-T <sub>2</sub> -Verhalten .....	71
2.3.1.4	P-T <sub>n</sub> -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	Bondgrafan	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	$\lambda$ -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 Antriebes .....	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 ( $\mu\text{C}$ ) .....	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

<b>Sachwortverzeichnis .....</b>	<b>459</b>
----------------------------------	------------

# 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**.

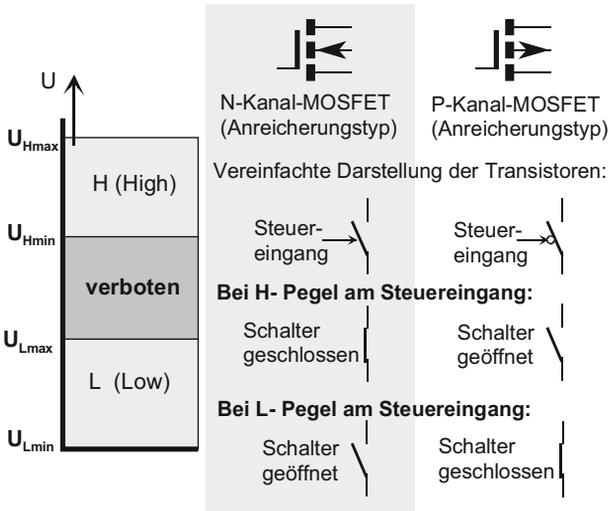
### ■ 4.1 Schalterlogik und binäre Signale

#### 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

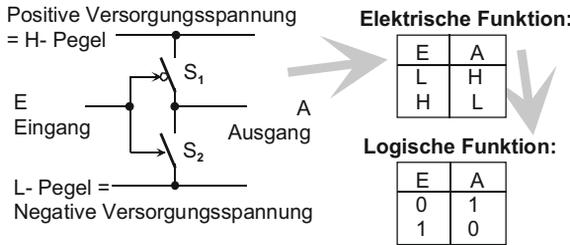
Ein Vorteil dieser Darstellungsform ist, dass man elementare Transistorfunktionen nicht weiter betrachten muss.

#### 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.



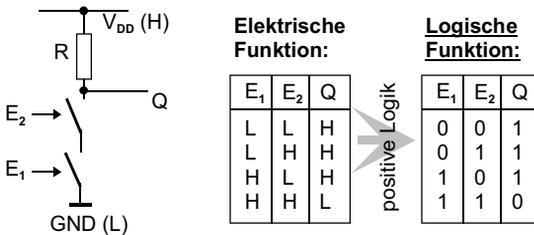
**Bild 4.2** Technische Realisierung der Negation

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:

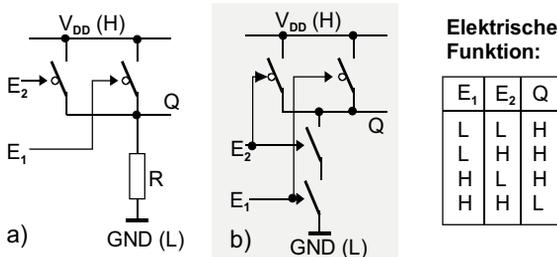
- Zwei Schalter sind parallel geschaltet: S ist geschlossen wenn  $S_1$  ODER  $S_2$  geschlossen ist (Bild 4.4a).
- Zwei Schalter sind in Reihe geschaltet: S ist geschlossen wenn  $S_1$  UND  $S_2$  geschlossen sind (Bild 4.3).

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.

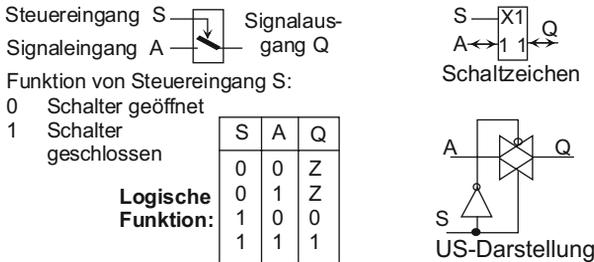
Die Negation wird durch eine einfache Kreislinie am Ausgang (oder bei Bedarf auch am Eingang) eines Gatters gekennzeichnet.

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.

Bekanntes 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:

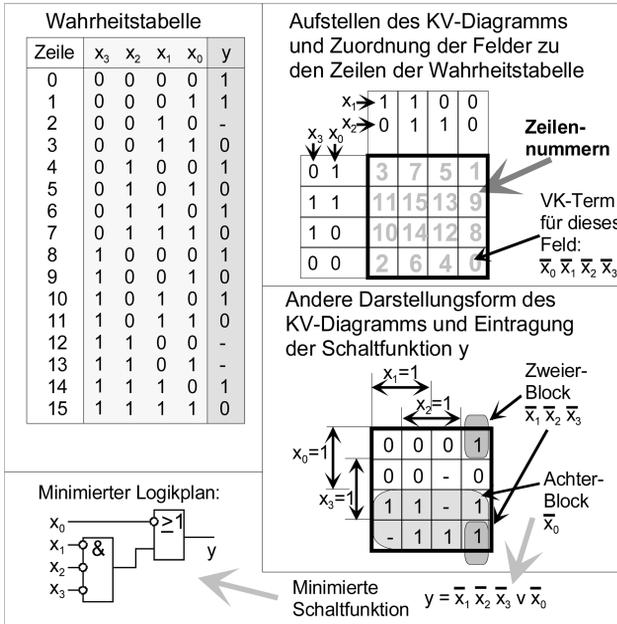
- Jeder möglichen Zeile der Wahrheitstabelle wird ein Feld im KV-Diagramm zugeordnet. Für  $n$  Eingangsvariablen sind also  $2^n$  Felder vorzusehen.
- Die Anordnung der Felder wird so gewählt, dass sich benachbarte Felder immer hinsichtlich genau einer Variablen unterscheiden. Diese Wahl wird durch 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

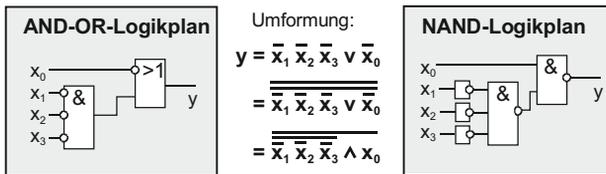
Im zweiten Arbeitsschritt wird auf die Frage eingegangen, welche Gatterfunktionen für die technische Umsetzung zu benutzen sind.

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  
Anpasserschaltung 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 ( $\mu\text{C}$ ) 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-Potenziometer 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