

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b>	5
<b>1 Digitale Steuerungstechnik</b>	11
1.1 Einführung	11
1.2 Zahlensysteme und Codierung von Zahlen	14
1.2.1 Stellenwertzahlensysteme	14
1.2.2 Duales Zahlensystem	16
1.2.2.1 Regeln für das Rechnen mit Dualzahlen	17
1.2.2.2 Subtraktion und Darstellung negativer Zahlen	17
1.2.3 Codierung von Zahlenwerten	22
1.2.3.1 Dualcode	22
1.2.3.2 Dezimale Binärcodes (BCD-Codes)	23
1.2.4 Fehlererkennung	24
1.3 Grundlagen der Schaltalgebra	26
1.3.1 Binäre Elemente und binäre Variable	26
1.3.2 Logische Verknüpfung von binären Variablen	28
1.3.3 Rechenregeln der Schaltalgebra	31
1.3.4 Ermittlung von Schaltfunktionen aus der Funktionstabelle	32
1.3.4.1 Normalformen	32
1.3.4.2 Vereinfachung von Schaltfunktionen mit dem Karnaugh-Veitch-Diagramm	34
1.4 Schaltnetze oder kombinatorische Schaltungen	37
1.4.1 Motorsteuerung mit Verriegelung	38
1.4.2 Addierschaltung für 2 duale Stellen	38
1.4.3 Codeumsetzer vom BCD-Code in den 7-Segment-Code	38
1.5 Schaltwerke	40
1.5.1 Bistabile Kippschaltungen: Flipflops	40
1.5.1.1 SR-Basisflipflop	41
1.5.1.2 1-Speicher-Flipflops mit Takteingang	42
1.5.1.3 Doppelspeicher-Flipflops	44
1.5.1.4 Schaltzustandstabelle und Steuertabelle der verschiedenen Flipfloptypen	46
1.5.1.5 Schmitt-Trigger	47
1.5.2 Zeitbegrenzte Speicher für binäre Werte	48
1.5.2.1 Monostabile Kippschaltungen: Monoflops	48
1.5.2.2 Verzögerungsglieder	48
1.5.3 Struktur und Wirkungsweise eines Schaltwerkes	49
1.5.4 Entwurf von Schaltwerken	50
1.5.5 Zählaltungen	53
1.6 Steuerungen mit asynchronen Schaltwerken	54
1.6.1 Entprellschaltung, Richtimpulserzeugung	54
1.6.2 Einfache Ein-/Aus-Steuerungen	56

1.6.2.1	Steuerung für Tippbetrieb mit Verriegelung . . . . .	56
1.6.2.2	Ein-/Aus-Steuerung für einen Motor . . . . .	57
1.6.3	Auswerteschaltung für einen Inkrementalgeber . . . . .	57
1.6.4	Ablaufsteuerungen mit asynchronen Ablaufketten . . . . .	58
1.6.4.1	Darstellung eines Steuerungsablaufs im Funktionsplan nach DIN 40713, Teil 6 . . . . .	58
1.6.4.2	Entwurf einer Ablaufsteuerung für eine Abfülleinrichtung . . . . .	60
1.7	Realisierung digitaler Funktionen und Steuerungen . . . . .	62
1.7.1	Elektronische Standardschaltungen für logische und digitale Funktionen . .	62
1.7.2	Integrierte Halbleiterspeicher . . . . .	64
1.7.3	Programmierbare Logikschaltungen . . . . .	66
1.7.4	Speicherprogrammierbare Steuerungen . . . . .	68
1.7.5	Mikrocomputer und Universalrechner . . . . .	70
<b>2</b>	<b>Regelungstechnik . . . . .</b>	<b>73</b>
2.1	Grundbegriffe der Regelungstechnik . . . . .	73
2.2	Mathematische Beschreibung des Übertragungsverhaltens kontinuierlicher Systeme .	76
2.2.1	Kontinuierliche und diskrete Systeme . . . . .	76
2.2.2	Beharrungsverhalten und Übertragungsbeiwert von Übertragungsgliedern .	77
2.2.3	Linearisierung eines nichtlinearen Übertragungsgliedes . . . . .	78
2.2.4	Allgemeines Übertragungsverhalten linearer, kontinuierlicher und zeitinvarianter Übertragungsglieder . . . . .	79
2.2.4.1	Beschreibung des Übertragungsverhaltens im Zeitbereich . . . . .	79
2.2.4.2	Laplace-Transformation . . . . .	82
2.2.4.3	Lösung einer linearen Differentialgleichung mit der Laplace-Transformation . . . . .	85
2.2.4.4	Übertragungsfunktion und Frequenzgang . . . . .	87
2.2.5	Grundstrukturen von Signalflussplänen und ihre Zusammenfassung . . . .	89
2.3	Arten linearer, kontinuierlicher Übertragungsglieder . . . . .	90
2.3.1	Proportionalglieder (P-Glieder) . . . . .	90
2.3.1.1	Proportionalglied mit Verzögerung 0. Ordnung (P-T0-Glied) . . . .	91
2.3.1.2	Proportionalglied mit Verzögerung 1. Ordnung (P-T1-Glied) . . . .	92
2.3.1.3	Proportionalglied mit Verzögerung 2. Ordnung (P-T2-Glied) . . . .	93
2.3.1.4	Proportionalglied mit Verzögerung $n$ . Ordnung (P-Tn-Glied) . . . .	96
2.3.2	Integralglieder (I-Glieder) . . . . .	97
2.3.2.1	Integralglied 1. Ordnung (I-T0-Glied) . . . . .	98
2.3.2.2	Integralglied 2. Ordnung (I-T1-Glied) . . . . .	100
2.3.2.3	Integralglieder $n$ . Ordnung (I-Tn-1-Glieder) . . . . .	101
2.3.3	Totzeitglieder (Tt-Glieder) . . . . .	102
2.3.4	Differentialglieder (D-Glieder) . . . . .	104
2.3.5	Reglerglieder . . . . .	106
2.4	Analyse und Entwurf kontinuierlicher Regelungssysteme . . . . .	110
2.4.1	Regelverhalten eines Regelkreises . . . . .	110
2.4.2	Stabilität von Regelkreisen . . . . .	113
2.4.2.1	Stabilität und Stabilitätsbedingungen . . . . .	113
2.4.2.2	Stabilitätskriterium von HURWITZ . . . . .	115
2.4.2.3	Nyquist-Kriterium . . . . .	116
2.4.2.4	Beurteilung der Stabilitätsgüte mit den Werten von Amplituden- und Phasenrand . . . . .	118
2.4.3	Verfahren für den Reglerentwurf . . . . .	120
2.4.3.1	Einstellkriterien für Regelkreise . . . . .	120
2.4.3.2	Empirische Einstellregeln von ZIEGLER und NICHOLS . . . . .	121
2.4.3.3	Frequenzkennlinienverfahren . . . . .	123

2.4.3.4	Reglerentwurf nach dem Betragsoptimum	126
2.4.3.5	Reglerentwurf mit dem Wurzelortskurvenverfahren	127
2.4.4	Auswahl der Regler für verschiedene Regelstrecken	133
2.5	Regelkreise mit komplexen Strukturen	134
2.5.1	Kaskadenregelung	134
2.5.2	Störgrößenaufschaltung	136
2.6	Regelkreise mit Schaltreglern	138
2.6.1	2-Punkt-Regler an P-T1-Tt-Strecke	139
2.6.2	2-Punkt-Regler mit innerer Rückführung	141
2.7	Digitale Regelung	143
2.7.1	Einführung in zeitdiskrete Signale und Systeme	143
2.7.2	Zeitdiskrete Betrachtung kontinuierlicher Systeme mit Differenzengleichungen im Zeitbereich	144
2.7.3	Beschreibung diskreter Systeme im Frequenzbereich	147
2.7.3.1	Darstellung diskreter Signale mit $\delta$ -Impulsen	147
2.7.3.2	$z$ -Transformation diskreter Signale	148
2.7.3.3	Inverse $z$ -Transformation	150
2.7.3.4	Übertragungsverhalten diskreter Systeme im Frequenzbereich	152
2.7.4	Regelkreis aus digitalem Regler und kontinuierlicher Regelstrecke	156
2.7.4.1	Einführung	156
2.7.4.2	Exakte $z$ -Übertragungsfunktion von Halteglied und kontinuierlichem Glied	156
2.7.4.3	Angenäherte $z$ -Übertragungsfunktion kontinuierlicher Glieder	158
2.7.4.4	Quasistetige Regelung	160
2.8	Zustandsregelung	164
2.8.1	Übertragungsverhalten von Mehrgrößensystemen im Zustandsraum	164
2.8.1.1	Zustandsraumdarstellung von Mehrgrößensystemen	164
2.8.1.2	Zustandsraumdarstellung eines 1-Größen-Systems 2. Ordnung	166
2.8.1.3	Übertragungsverhalten und Übertragungsmatrix	168
2.8.2	Normalformen für 1-Größen-Systeme in Zustandsraumdarstellung	169
2.8.2.1	Regelungsnormalform oder Frobenius-Form	169
2.8.2.2	Beobachtungsnormalform	171
2.8.2.3	Diagonalform oder Jordan-Normalform	172
2.8.2.4	Basistransformation im Zustandsraum	173
2.8.3	Zustandsregelung	176
2.8.3.1	Übersicht	176
2.8.3.2	Zustandsreglerentwurf durch Polvorgabe für ein 1-Größen-System in Regelungsnormalform	177
2.8.3.3	Reglerentwurf durch Polvorgabe bei beliebiger Zustandsraumdarstellung	181
2.8.3.4	Zustandsregelung mit Beobachter	184
2.8.3.5	Geschlossener Zustandsregelkreis mit Beobachter	189
2.8.3.6	Realisierung von Zustandsreglern und Beobachtern	193
2.9	Optimale Zustandsregelung	193
2.9.1	Optimale Steuerung	193
2.9.2	Optimale Regelung	194
2.9.2.1	Optimale Regelung mit linear quadratischem Regler (LQR)	194
2.9.2.2	Regelkreis mit linear quadratischem Regler und Rückführung der Zustandsgrößen	198
2.9.2.3	Linear quadratischer Regler für 1-Größen-Regelstrecken 1. Ordnung	199
2.9.2.4	Allgemeiner linear quadratischer Regler für 1-Größen-Regelstrecken 2. Ordnung	200
2.9.2.5	Optimale Zustandsregelung einer I-T1-Strecke	202
2.10	Steuern und Regeln mit Fuzzy-Logik	205

<b>3</b>	<b>Mechanische Systeme</b>	<b>211</b>
3.1	Kinematik	211
3.1.1	Koordinatensystem	211
3.1.2	Bewegung eines Punktes	212
3.1.3	Bewegung eines starren Körpers	220
3.1.4	Euler- und Kardan-Winkel	221
3.1.5	Geschwindigkeit und Winkelgeschwindigkeit eines starren Körpers	225
3.1.6	Beschleunigung und Winkelbeschleunigung eines starren Körpers	228
3.1.7	Ebene Bewegung eines starren Körpers	229
3.1.8	Beschreibung der Starrkörperbewegung im bewegten Referenzsystem	231
3.1.9	Kinematik der Mehrkörpersysteme	234
3.1.10	Kinematische Ketten	238
3.1.11	Denavit-Hartenberg-Methode	241
3.1.12	Rückwärtstransformation	246
3.2	Kinetik	248
3.2.1	Newton-Euler'sche Gleichungen	249
3.2.2	Bewegungsgleichungen für Mehrkörpersysteme	254
3.2.3	Lagrange'sche Gleichungen	258
<b>4</b>	<b>Mechatronisches Beispiel</b>	<b>265</b>
4.1	1-m-Spiegelteleskop mit optischer Bank	266
4.2	Die optische Bank (FPOB: Focal Plane Optical Bench)	268
4.3	Mechatronik der optischen Bodenstation	269
4.3.1	Mechatronik in den optischen Komponenten	269
4.3.2	Mechatronik im 12,5-m-Radom	274
4.3.3	Elektronische Steueranlage des Teleskops	274
4.3.3.1	Funktionen	276
4.3.3.2	Systemkonfiguration	278
4.3.3.3	Software und Operation	279
4.4	Aufstellung der optischen Bodenstation	280
<b>5</b>	<b>Mathematik zur Mechatronik</b>	<b>283</b>
5.1	Matrizenrechnung	283
5.1.1	Schreibweise von Matrizen und Vektoren	283
5.1.2	Addition zweier Matrizen	284
5.1.3	Multiplikation mit einem Skalar	284
5.1.4	Matrizenmultiplikation	284
5.1.5	Gesetze beim Matrizenprodukt	285
5.1.6	Sonderfälle der Matrizenmultiplikation	285
5.1.7	Zusammenhang zwischen Transponieren und Multiplizieren	286
5.1.8	Inverse Matrix (Kehrmatrix) einer quadratischen Matrix	286
5.1.9	Produktsatz für Determinanten	287
5.2	Matrizendarstellung linearer Gleichungssysteme	287
5.3	Quadratische Form	287
5.4	Ableitung von Ausdrücken mit Matrizen	288
5.5	Numerische Integration	289
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>291</b>
	<b>Weiterführende Literatur</b>	<b>293</b>
	<b>Stichwortverzeichnis</b>	<b>295</b>