

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b> . . . . .	5
<b>1</b> <b>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 Zählschaltungen . . . . .	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 Differenzen-gleichungen 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-Großen-Systems 2. Ordnung . . . . .	166
2.8.1.3	Übertragungsverhalten und Übertragungsmatrix . . . . .	168
2.8.2	Normalformen für 1-Großen-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-Großen-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-Großen-Regelstrecken 1. Ordnung . . . . .	199
2.9.2.4	Allgemeiner linear quadratischer Regler für 1-Großen-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>	211
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>	265
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>	283
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	Nummerische Integration	289
<b>Literaturverzeichnis</b>		291
<b>Weiterführende Literatur</b>		293
<b>Stichwortverzeichnis</b>		295