

Peter Busch

Elementare Regelungstechnik

Allgemeingültige Darstellung
ohne höhere Mathematik

6. Auflage

Vogel Buchverlag

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	5
1 Einführung	13
1.1 Steuern – Regeln	13
1.1.1 Steuern	13
1.1.2 Regeln	14
1.2 Aufgaben des Regelungstechnikers	15
1.3 Blockschaltbilder	16
1.4 Einteilung der Regler	18
1.4.1 Analoge Regler	18
1.4.1.1 Stetige Regler	18
1.4.1.2 Unstetige Regler	18
1.4.2 Digitale Regler	19
1.5 Grundsaltungen von Operationsverstärkern	19
1.5.1 Invertierender Verstärker	20
1.5.2 Nichtinvertierender Verstärker	22
1.5.2.1 Impedanzwandler	23
1.5.3 Subtrahierer	23
1.5.4 Integrierer	24
1.5.5 Differenzierer	27
1.5.6 Addierer	29
2 Analyse von Übertragungsgliedern	31
2.1 Zeitverhalten	31
2.1.1 Sprungantwort	31
2.1.2 Anstiegsantwort	33
2.2 Frequenzverhalten	34
3 Zeitverhalten von Übertragungsgliedern	35
3.1 Proportionalglieder	35
3.1.1 P-Regler	36
3.1.2 P-Strecken	38
3.2 Integralglieder	39
3.2.1 I-Regler	41
3.2.1.1 PI-Regler	42
3.2.2 I-Strecken	43
3.3 Differentialglieder	45
3.3.1 D-Regler	47
3.3.1.1 PD-Regler	48
3.3.1.2 PID-Regler	49
3.3.2 D-Strecken	50
3.4 Verzögerungsglieder	51
3.4.1 Verzögerungsglieder erster Ordnung	51

3.4.2	Verzögerungsglieder zweiter Ordnung	53
3.4.3	Verzögerungsglieder höherer Ordnung	56
3.4.4	Verzögerungsglieder mit Totzeit	56
3.5	Zusammenfassung	57
4	Rechnen in der komplexen Ebene	59
4.1	Imaginäre Zahlen	59
4.1.1	Rechnen mit imaginären Zahlen	59
4.2	Komplexe Zahlen	61
4.2.1	Rechnen mit komplexen Zahlen	61
4.3	Darstellung von imaginären und komplexen Zahlen in der Gaußschen Zahlenebene	63
4.4	Komplexe Rechnung in der Elektrotechnik	67
4.4.1	Komplexe Widerstände	67
4.4.2	Ortskurven	71
4.4.3	Komplexe Leitwerte	73
4.4.4	Inversion von Ortskurven	76
4.5	Komplexe Rechnung in der Regelungstechnik	77
4.5.1	Übertragungsfunktionen	78
4.5.1.1	P-Glied	79
4.5.1.2	I-Glied	80
4.5.1.3	D-Glied	81
4.5.1.4	T_1 -Glied	81
4.5.1.5	T_2 -Glied	82
4.5.1.6	T_n -Glieder höherer Ordnung und T_T -Glieder	83
4.5.2	Arbeiten mit Übertragungsfunktionen	83
4.6	Ortskurven	84
4.6.1	P-Glied	85
4.6.2	I-Glied	85
4.6.3	D-Glied	85
4.6.4	T_1 -Glied	86
4.6.4.1	Ortskurve des T_1 -Gliedes durch Inversion	87
4.6.5	T_2 -Glied	89
4.6.5.1	Eckfrequenz eines T_2 -Gliedes	90
4.6.5.2	Dämpfung eines T_2 -Gliedes	91
4.6.6	T_D -Glied	96
4.6.7	T_T -Glied	96
4.7	Bode-Diagramme	99
4.7.1	P-Glied	100
4.7.2	I-Glied	101
4.7.3	D-Glied	103
4.7.4	T_1 -Glied	104
4.7.4.1	Amplitudengang	105
4.7.4.2	Phasengang	107
4.7.5	T_2 -Glied	107
4.7.5.1	Amplitudengang	108
4.7.5.2	Phasengang	110
4.7.6	T_T -Glied	111
5	Verbindmöglichkeiten von Regelkreisgliedern	113
5.1	Reihenschaltung	113
5.1.1	Zeitverhalten	114
5.1.1.1	D- T_1 -Glied	114

5.1.1.2	I-T ₁ -Glied	115
5.1.1.3	P-T ₁ -Glied	116
5.1.1.4	P-T ₂ -Glied	117
5.1.2	Ortskurven	118
5.1.2.1	D-T ₁ -Glied	118
5.1.2.2	I-T ₁ -Glied	119
5.1.2.3	P-T ₁ -Glied	121
5.1.2.4	P-T ₂ -Glied	121
5.1.3	Bode-Diagramme	122
5.1.3.1	D-T ₁ -Glied	122
5.1.3.2	I-T ₁ -Glied	123
5.1.3.3	P-T ₁ -Glied	124
5.1.3.4	P-T ₂ -Glied	125
5.1.3.5	T ₁ -T ₁ -Glied	125
5.2	Parallelschaltung	127
5.2.1	Zeitverhalten	127
5.2.1.1	PD-Glied	127
5.2.1.2	PI-Glied	130
5.2.1.3	PID-Glied	130
5.2.2	Ortskurven	132
5.2.2.1	PD-Glied	133
5.2.2.2	PI-Glied	133
5.2.2.3	PID-Glied	134
5.2.3	Bode-Diagramme	135
5.2.3.1	PD-Glied	135
5.2.3.2	PI-Glied	136
5.2.3.3	PID-Glied	138
5.3	Gruppenschaltung	140
5.3.1	PD-T ₁ -Schaltung	140
5.3.1.1	Zeitverhalten	141
5.3.1.2	Übertragungsfunktion und Ortskurve	142
5.3.1.3	Bode-Diagramm	144
5.3.2	PID-T ₁ -Schaltung	147
5.3.2.1	Zeitverhalten	147
5.3.2.2	Übertragungsfunktion und Ortskurve	148
5.3.2.3	Bode-Diagramm	149
5.3.3	PI(D-T ₁)-Schaltung	150
5.3.4	Zusammenstellung der Bode-Diagramme	150
6	Der Regelkreis	155
6.1	Aufgaben von Reglern	156
6.1.1	Anfahrverhalten	156
6.1.2	Führungsverhalten	157
6.1.3	Störverhalten	157
6.2	Berechnung eines Regelkreises	157
6.2.1	Führungsverhalten	158
6.2.2	Störverhalten	158
6.2.3	Bleibende Regeldifferenz	159
6.3	Schwingungen im Regelkreis	160
6.4	Stabilität	161
6.4.1	Stabilitätskriterium mit Ortskurve (Nyquist-Kriterium)	162
6.4.1.1	Stabilitätsgüte mit Ortskurve	163

6.4.2	Stabilitätskriterium mit Bode-Diagramm	165
6.4.2.1	Stabilitätsgüte mit Bode-Diagramm	166
6.5	Die optimale Reglereinstellung	168
6.5.1	Regelgüte	168
6.6	Strecken mit und ohne Ausgleich	170
7	Regelkreise mit stetigen Reglern	171
7.1	Strecken mit Ausgleich	171
7.1.1	Regelung einer P-Strecke	171
7.1.1.1	P-Strecke mit P-Regler	172
	Stabilität	173
7.1.1.2	P-Strecke mit I-Regler	173
	Führungsverhalten	173
	Störverhalten	174
	Stabilität	175
7.1.1.3	P-Strecke mit PI-Regler	176
	Führungsverhalten	176
	Störverhalten	176
	Stabilität	177
7.1.2	Regelung einer P-T ₁ -Strecke	178
7.1.2.1	P-T ₁ -Strecke mit P-Regler	179
	Führungsverhalten	179
	Störverhalten	180
	Stabilität	180
7.1.2.2	P-T ₁ -Strecke mit I-Regler	182
	Führungsverhalten	182
	Störverhalten	183
	Stabilität	184
7.1.2.3	P-T ₁ -Strecke mit PI-Regler	186
	Stabilität	186
7.1.3	Regelung einer P-T ₂ -Strecke	187
7.1.3.1	P-T ₂ -Strecke mit P-Regler	188
	Führungsverhalten	188
	Störverhalten	190
	Stabilität	190
7.1.3.2	P-T ₂ -Strecke mit I-Regler	190
7.1.3.3	P-T ₂ -Strecke mit PI-Regler	192
7.1.3.4	P-T ₂ -Strecke mit PD-Regler	192
7.1.3.5	P-T ₂ -Strecke mit PID-Regler	194
	Stabilität	194
7.1.4	Regelung von verzögerten Strecken höherer Ordnung	194
7.1.4.1	Reglereinstellung bei verzögerten Strecken höherer Ordnung	195
	FEinstellung nach C11R	196
	FEinstellung nach Ziegler und Nichols	197
7.1.4.2	Kontrolle der Optimierung	197
7.2	Strecken ohne Ausgleich	200
7.2.1	Regelung einer I-Strecke	200
7.2.1.1	I-Strecke mit P-Regler	200
	Führungsverhalten	200
	Störverhalten	201
	Stabilität	201
7.2.1.2	I-Strecke mit I-Regler	201
	Führungsverhalten	201

7.2.1.3	I-Strecke mit PI-Regler	202
	<i>Führungsverhalten</i>	202
	<i>Störverhalten</i>	202
	<i>Stabilität</i>	203
7.2.2	Regelung einer I-T ₁ -Strecke	203
7.2.2.1	I-T ₁ -Strecke mit PD-Regler	203
	<i>Führungsverhalten</i>	204
	<i>Störverhalten</i>	204
	<i>Stabilität</i>	205
7.2.3	Reglereinstellung bei verzögerten I-Strecken	206
7.2.3.1	Reglereinstellung für I-T ₁ -Strecke	210
7.2.3.2	Reglereinstellung für I-T ₂ -Strecke	210
7.3	Strecken mit Totzeit	212
7.3.1	Regelung einer Totzeit-Strecke	212
7.3.1.1	Totzeit-Strecke mit P-Regler	212
	<i>Führungsverhalten</i>	212
	<i>Störverhalten</i>	214
	<i>Stabilität</i>	215
7.3.1.2	Totzeit-Strecke mit I-Regler	215
	<i>Führungsverhalten</i>	215
	<i>Störverhalten</i>	217
	<i>Stabilität</i>	217
8	Unstetige Regler	219
8.1	Zweipunktregler	219
8.1.1	Regelung einer P-T ₁ -Strecke mit Zweipunktregler	220
8.1.1.1	Schaltfrequenz	221
8.1.1.2	Leistungsüberschuß	223
8.1.2	Regelung einer P-T ₀ -Strecke mit Zweipunktregler	223
8.1.2.1	Zweipunktregelung mit Grundlast	226
8.1.3	Regelung einer I-Strecke mit Zweipunktregler	228
8.1.4	Regelung einer verzögerten I-Strecke mit Zweipunktregler	229
8.2	Dreipunktregler	230
8.3	Unstetige Regler mit Rückführung	232
8.3.1	Zweipunktregler mit verzögerter Rückführung	233
8.3.2	Zweipunktregler mit verzögert-nachgebender Rückführung	235
9	Digitale Regelung	237
9.1	Funktion eines digitalen Reglers	237
9.1.1	Abtasten und Digitalisieren der Regelgröße	237
9.1.2	Erzeugen der Stellgröße	240
9.2	Regelalgorithmus	241
9.2.1	P-Anteil	241
9.2.1.1	Proportionalbereich	242
9.2.2	I-Anteil	242
9.2.2.1	Integrieren bei Analogreglern	242
9.2.2.2	Näherungsverfahren bei Digitalreglern	243
9.2.3	D-Anteil	245
9.2.4	PID-Algorithmus	247
9.3	Adaptive Regler	248

10 Fuzzy-Logik	251
10.1 Was ist Fuzzy-Logik?	251
10.2 Vorteile von Fuzzy-Regelung	252
10.2.1 Zeitkritisch	252
10.2.2 Zeitvariant	252
10.2.3 Nichtlinear	252
10.3 Grundlagen der Fuzzy-Logik	253
10.3.1 Regelungstechnik	253
10.3.2 Steuerungstechnik	254
10.3.3 Fuzzy-Logik	254
10.3.4 Zugehörigkeitsfunktionen	255
10.3.5 Verknüpfungen von Zugehörigkeitsfunktionen	261
10.3.6 Fuzzy-Regeln	261
10.3.7 Defuzzyfizierung	263
10.3.8 Einsatz der Fuzzy-Logik in der Regelungstechnik	265
10.4 Berechnung von Flächenschwerpunkten	268
Anhang	270
Lösungen der Übungsaufgaben	270
Literaturverzeichnis	288
Stichwortverzeichnis	289