

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b>	<b>5</b>
<b>1 Einführung</b>	<b>13</b>
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 Grundschaltungen 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
<b>2 Analyse von Übertragungsgliedern</b>	<b>31</b>
2.1 Zeitverhalten	31
2.1.1 Sprungantwort	31
2.1.2 Anstiegsantwort	33
2.2 Frequenzverhalten	34
<b>3 Zeitverhalten von Übertragungsgliedern</b>	<b>35</b>
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 $T_r$ -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	Resonanzfrequenz eines $T_2$ -Gliedes . . . . .	90
4.6.5.2	Dämpfung eines $T_2$ -Gliedes . . . . .	91
4.6.6	$T_n$ -Glied . . . . .	96
4.6.7	$T_r$ -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	$T_r$ -Glied . . . . .	111
5	Verbindungsmöglichkeiten 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 <sub>1</sub> -Glieder	115
5.1.1.3	P-T <sub>1</sub> -Glieder	116
5.1.1.4	P-T <sub>2</sub> -Glieder	117
5.1.2	Ortskurven	118
5.1.2.1	D-T <sub>1</sub> -Glieder	118
5.1.2.2	I-T <sub>1</sub> -Glieder	119
5.1.2.3	P-T <sub>1</sub> -Glieder	121
5.1.2.4	P-T <sub>2</sub> -Glieder	121
5.1.3	Bode-Diagramme	122
5.1.3.1	D-T <sub>1</sub> -Glieder	122
5.1.3.2	I-T <sub>1</sub> -Glieder	123
5.1.3.3	P-T <sub>1</sub> -Glieder	124
5.1.3.4	P-T <sub>2</sub> -Glieder	125
5.1.3.5	T <sub>1</sub> -T <sub>1</sub> -Glieder	125
5.2	Parallelschaltung	127
5.2.1	Zeitverhalten	127
5.2.1.1	PD-Glieder	127
5.2.1.2	PI-Glieder	130
5.2.1.3	PID-Glieder	130
5.2.2	Ortskurven	132
5.2.2.1	PD-Glieder	133
5.2.2.2	PI-Glieder	133
5.2.2.3	PID-Glieder	134
5.2.3	Bode-Diagramme	135
5.2.3.1	PD-Glieder	135
5.2.3.2	PI-Glieder	136
5.2.3.3	PID-Glieder	138
5.3	Gruppenschaltung	140
5.3.1	PD-T <sub>1</sub> -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 <sub>1</sub> -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 <sub>1</sub> )-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
	<i>Stabilität</i> . . . . .	173
7.1.1.2	P-Strecke mit I-Regler . . . . .	173
	<i>Führungsverhalten</i> . . . . .	173
	<i>Störverhalten</i> . . . . .	174
	<i>Stabilität</i> . . . . .	175
7.1.1.3	P-Strecke mit PI-Regler . . . . .	176
	<i>Führungsverhalten</i> . . . . .	176
	<i>Störverhalten</i> . . . . .	176
	<i>Stabilität</i> . . . . .	177
7.1.2	Regelung einer P-T <sub>1</sub> -Strecke . . . . .	178
7.1.2.1	P-T <sub>1</sub> -Strecke mit P-Regler . . . . .	179
	<i>Führungsverhalten</i> . . . . .	179
	<i>Störverhalten</i> . . . . .	180
	<i>Stabilität</i> . . . . .	180
7.1.2.2	P-T <sub>1</sub> -Strecke mit I-Regler . . . . .	182
	<i>Führungsverhalten</i> . . . . .	182
	<i>Störverhalten</i> . . . . .	183
	<i>Stabilität</i> . . . . .	184
7.1.2.3	P-T <sub>1</sub> -Strecke mit PI-Regler . . . . .	186
	<i>Stabilität</i> . . . . .	186
7.1.3	Regelung einer P-T <sub>2</sub> -Strecke . . . . .	187
7.1.3.1	P-T <sub>2</sub> -Strecke mit P-Regler . . . . .	188
	<i>Führungsverhalten</i> . . . . .	188
	<i>Störverhalten</i> . . . . .	190
	<i>Stabilität</i> . . . . .	190
7.1.3.2	P-T <sub>2</sub> -Strecke mit I-Regler . . . . .	190
7.1.3.3	P-T <sub>2</sub> -Strecke mit PI-Regler . . . . .	192
7.1.3.4	P-T <sub>2</sub> -Strecke mit PD-Regler . . . . .	192
7.1.3.5	P-T <sub>2</sub> -Strecke mit PID-Regler . . . . .	194
	<i>Stabilität</i> . . . . .	194
7.1.4	Regelung von verzögerten Strecken höherer Ordnung . . . . .	194
7.1.4.1	Reglereinstellung bei verzögerten Strecken höherer Ordnung . . . . .	195
	<i>Einstellung nach CHR</i> . . . . .	196
	<i>Einstellung nach ZIEGLER und NICHOLS</i> . . . . .	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
	<i>Führungsverhalten</i> . . . . .	200
	<i>Störverhalten</i> . . . . .	201
	<i>Stabilität</i> . . . . .	201
7.2.1.2	I-Strecke mit I-Regler . . . . .	201
	<i>Führungsverhalten</i> . . . . .	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 <sub>1</sub> -Strecke	203
7.2.2.1	I-T <sub>1</sub> -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 <sub>1</sub> -Strecke	210
7.2.3.2	Reglereinstellung für I-T <sub>2</sub> -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 <sub>1</sub> -Strecke mit Zweipunktregler	220
8.1.1.1	Schaltfrequenz	221
8.1.1.2	Leistungsüberschuß	223
8.1.2	Regelung einer P-T <sub>n</sub> -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	Abrasten 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

<b>10 Fuzzy-Logik</b>	<b>251</b>
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 Defuzzifizierung	263
10.3.8 Einsatz der Fuzzy-Logik in der Regelungstechnik	265
10.4 Berechnung von Flächenschwerpunkten	268
<b>Anhang</b>	<b>270</b>
<b>Lösungen der Übungsaufgaben</b>	<b>270</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>288</b>
<b>Stichwortverzeichnis</b>	<b>289</b>