

Inhalt

1	Einführung	15
1.1	Aufgaben der Regelungstechnik	15
1.2	Steuern oder Regeln?	15
1.3	Regelkreise im Wirkungsplan	21
1.4	Festwert- und Folgeregelung.....	23
1.4.1	Festwertregelung	24
1.4.2	Folgeregelung	25
1.4.3	Zeitgeführte Regelung.....	27
1.5	Mehrgrößenregelung.....	28
1.6	Elemente und Größen des Regelkreises	29
2	Die Regelstrecke	33
2.1	Regelstrecken mit und ohne Ausgleich	33
2.2	Statisches Verhalten der Regelstrecke	35
2.3	Dynamisches Verhalten der Regelstrecke	41
2.3.1	Proportional-Glied (P-Glied)	49
2.3.2	P-T ₁ -Glied (Verzögerungsglied 1. Ordnung)	54
2.3.3	P-T ₂ -Glied (Verzögerungsglied 2. Ordnung)	62
2.3.4	P-T ₂ S-Glied.....	66
2.3.5	P-T _n -Glied (Verzögerungsglied <i>n</i> -ter Ordnung).....	72
2.3.6	Totzeitglied (P-T _r -Glied).....	74
2.3.7	Allpass-Glieder	75
2.3.8	Regelbarkeit	75
2.3.9	Integrier-Glied (I-Glied).....	77
2.3.10	I-T ₁ -Glied	80
2.3.11	Weitere Übertragungsglieder ohne Ausgleich	81
2.3.12	Doppelt-integrierende Regelstrecken	85
2.3.13	Zeit-Kennwerte gebräuchlicher Regelstrecken	87
2.4	Experimentelle Ermittlung von Strecken-Kenngrößen aus der Sprungantwort	88
2.4.1	Verfahren nach <i>Küpfmüller</i>	88
2.4.2	Verfahren nach <i>Strejc</i>	89
2.4.3	Verfahren nach <i>Naslin</i>	92
2.4.4	Verfahren nach <i>Ormanns</i>	96
2.4.5	Wendetangentenverfahren.....	98

2.4.6	Verfahren der Zeitprozentkennwerte	101
2.4.7	Verfahren nach <i>Thal-Larsen</i>	103
2.4.8	Identifikation durch numerische Parameteroptimierung	108
2.4.9	Identifikation von Regelstrecken ohne Ausgleich	109
3	Regelungen mit PID-Reglern	113
3.1	Typen von Reglern	113
3.2	Der Proportional-Regler (P-Regler)	113
3.3	Der Integral-Regler (I-Regler)	128
3.4	Der Proportional-Integral-Regler (PI-Regler)	131
3.5	Der Proportional-Integral-Differential-Regler (PID-Regler)	138
3.6	Der Proportional-Differential-Regler (PD-Regler)	140
3.7	PID- T_1 - und PD- T_1 -Regler	143
3.8	Anti-Windup-Maßnahmen	144
3.9	Berücksichtigung von Stellgrößenbeschränkungen	145
4	Entwurf von PID-Reglern	147
4.1	Anforderungen an den Regelkreis	147
4.1.1	Führungs- und Störverhalten	147
4.1.2	Generelle Anforderungen an eine Regelung	149
4.1.3	Gütekriterien für das Führungsverhalten	150
4.1.4	Gütekriterien für das Störverhalten	151
4.1.5	Problem der bleibenden Regeldifferenz	152
4.2	Geeignete Regler-Strecken-Kombinationen	152
4.3	PID-Entwurf nach <i>Ziegler/Nichols</i>	153
4.3.1	Verfahren des Stabilitätsrands (Schwingversuch)	153
4.3.2	Verfahren der Sprungantwort-Analyse	155
4.4	Einstellregeln nach <i>Chien, Hrones</i> und <i>Reswick</i>	157
4.4.1	Einstellregeln für Strecken mit Ausgleich	157
4.4.2	Einstellregeln für Strecken ohne Ausgleich	161
4.5	Einstellregeln nach <i>Oppelt</i>	164
4.6	PID-Entwurf nach der T-Summen-Regel	166
4.7	PID-Entwurf nach dem Betragsoptimum	168
4.8	Numerische Optimierung von Reglern	171
4.9	Selbsteinstellende und adaptive Regler	174
5	Regelungen mit unstetigen Reglern	177
5.1	Unstetige Regler ohne Rückführung	177
5.1.1	Zweipunkt-Regler ohne Hysterese	177
5.1.2	Zweipunkt-Regler mit Hysterese	178
5.1.3	Drei- und Vierpunkt-Regler	190
5.2	Unstetige Regler mit Rückführung	195
5.2.1	Zweipunkt-Regler mit verzögerter Rückführung	195
5.2.2	Zweipunkt-Regler mit verzögert nachgebender Rückführung	197
5.2.3	Dreipunkt-Regler mit verzögerter Rückführung (Schrittregler)	200

6	Vermaschte Regelkreise	205
6.1	Störgrößenaufschaltung.....	205
6.2	Hilfsgrößenaufschaltung.....	209
6.3	Unterlagerte Regelung (Kaskadenregelung).....	210
6.4	Vorfilter und Vorsteuerung.....	212
7	Digitale Regelung	215
7.1	Prinzip der digitalen Regelung.....	215
7.2	Der digitale PID-Regler.....	217
7.3	Einstellregeln für digitale PID-Regler.....	222
8	Reglerentwurf im Frequenzbereich	227
8.1	Frequenzgang linearer Systeme.....	227
8.2	Grafische Darstellung des Frequenzgangs.....	232
8.3	Frequenzgang regelungstechnischer Grundglieder.....	234
8.3.1	P-Glied.....	234
8.3.2	P-T ₁ -Glied.....	236
8.3.3	P-T ₂ S-Glied.....	239
8.3.4	Totzeitglied.....	242
8.3.5	I-Glied.....	244
8.3.6	D-Glied.....	246
8.4	Frequenzgang von Reihenschaltungen.....	248
8.5	Frequenzgang des PID-Reglers.....	252
8.6	Stabilität von Regelkreisen.....	258
8.7	Reglerentwurf.....	264
8.7.1	Phasen- und Amplitudenreserve.....	264
8.7.2	PI-Regler.....	270
8.7.3	PID-Regler.....	272
8.7.4	PD-Regler.....	274
9	Unscharfe Regelung (Fuzzy Control)	277
9.1	Der Mensch als Regler.....	277
9.2	Grundlagen der Fuzzy-Logik.....	279
9.2.1	Fuzzy-Mengen.....	279
9.2.2	Linguistische Variablen und Terme.....	281
9.2.3	Fuzzy-Inferenz.....	282
9.2.4	Defuzzifizierung.....	285
9.2.5	Fuzzy-Inferenz bei mehreren Eingangsgrößen.....	287
9.3	Fuzzy Controller.....	291
9.4	Hybride und adaptive Fuzzy-Regelungssysteme.....	295
9.4.1	Nichtadaptive Systeme mit konventionellem Regler.....	296
9.4.2	Umschaltregelungen mit Fuzzy-Komponente.....	300
9.4.3	Adaptive Konzepte.....	301

10	Realisierung von Reglern	307
10.1	Mechanische Regler	307
10.2	Hydraulische und pneumatische Regler	309
10.3	Analogregler auf Basis von Operationsverstärkern	311
10.3.1	Grundschtaltung zur Realisierung von PID-Reglern	311
10.3.2	Elektronischer P-Regler.....	312
10.3.3	Elektronischer I-Regler	314
10.3.4	Elektronischer PI-Regler	314
10.3.5	Elektronischer PD-Regler.....	315
10.3.6	Elektronischer PID-Regler	315
10.3.7	Schaltende Regler.....	316
10.4	Digitalregler.....	317
10.5	SPS-Regler	324
11	Begleit-Software zum Buch	327
11.1	Installation der Software.....	327
11.2	Programmmodule von WINFACT 2016	328
11.3	Das blockorientierte Simulationssystem BORIS	329
11.3.1	Übersicht	329
11.3.2	Komponenten des BORIS-Hauptfensters	329
11.3.3	Aufbau der Simulationsstruktur.....	331
11.3.4	Steuerung der Simulation	332
11.3.5	Ermittlung von Frequenzgängen	333
11.4	Ermittlung von Frequenzgängen mit LISA	335
11.4.1	Übersicht	335
11.4.2	Einlesen der Daten.....	335
11.4.3	Darstellungsform und Speichern von Ergebnissen.....	336
11.5	Reglerentwurf im Frequenzbereich mit RESY	338
11.5.1	Übersicht	338
11.5.2	Bildschirmaufbau	340
11.5.3	Konfigurierung des Regelkreises.....	341
11.6	Entwurf und Analyse von Fuzzy-Systemen mit FLOP.....	341
11.6.1	Übersicht	341
11.6.2	Linguistische Variablen.....	343
11.6.3	Regelbasis.....	343
11.6.4	Systemanalyse im Debug-Modus	344
12	Anwendungsbeispiel: Drehzahlregelung eines Gleichstromantriebs	347
12.1	Vorstellung der Regelstrecke.....	347
12.1.1	Modellierung des Motors	348
12.1.2	Modellierung des Stromrichters	349
12.1.3	Modellierung des Tachogenerators.....	350
12.1.4	Gesamtstruktur der Regelstrecke.....	350
12.1.5	Sprungantwort und Frequenzgang der Regelstrecke	352
12.2	Reglerentwurf im Zeitbereich.....	354

12.2.1	Schwingversuch nach <i>Ziegler/Nichols</i>	354
12.2.2	Einstellregeln nach <i>Chien, Hrones</i> und <i>Reswick</i>	356
12.2.3	Reglerentwurf nach der T-Summen-Regel	359
12.2.4	Reglerentwurf nach dem Betragsoptimum	360
12.2.5	Numerische Optimierung anhand des IAE-Kriteriums	361
12.2.6	Zweipunkt-Regelung der Gleichstrommaschine	363
12.3	Reglerentwurf im Frequenzbereich	364
12.3.1	Stabilitätsanalyse	364
12.3.2	Entwurf eines PI-Kompensationsreglers	366
12.4	Vergleich der Entwurfsergebnisse	368
Formelzeichen und Benennungen Deutsch - Englisch		371
Literatur		377
Stichwortverzeichnis		381