

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 ₁ -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 von Regelstrecken ohne Ausgleich	108
3	Regelungen mit PID-Reglern	111
3.1	Typen von Reglern	111
3.2	Der Proportional-Regler (P-Regler)	111
3.3	Der Integral-Regler (I-Regler)	126
3.4	Der Proportional-Integral-Regler (PI-Regler)	129
3.5	Der Proportional-Integral-Differential-Regler (PID-Regler)	136
3.6	Der Proportional-Differential-Regler (PD-Regler)	138
3.7	PID-T ₁ - und PD-T ₁ -Regler	141
3.8	Anti-Windup-Maßnahmen	142
3.9	Berücksichtigung von Stellgrößenbeschränkungen	143
4	Entwurf von PID-Reglern	145
4.1	Anforderungen an den Regelkreis	145
4.1.1	Führungs- und Störverhalten	145
4.1.2	Generelle Anforderungen an eine Regelung	147
4.1.3	Gütekriterien für das Führungsverhalten	148
4.1.4	Gütekriterien für das Störverhalten	149
4.1.5	Problem der bleibenden Regeldifferenz	150
4.2	Geeignete Regler-Strecken-Kombinationen	150
4.3	PID-Entwurf nach <i>Ziegler/Nichols</i>	151
4.3.1	Verfahren des Stabilitätsrands (Schwingversuch)	151
4.3.2	Verfahren der Sprungantwort-Analyse	153
4.4	Einstellregeln nach <i>Chien, Hrones</i> und <i>Reswick</i>	155
4.4.1	Einstellregeln für Strecken mit Ausgleich	155
4.4.2	Einstellregeln für Strecken ohne Ausgleich	159
4.5	Einstellregeln nach <i>Oppelt</i>	162
4.6	PID-Entwurf nach der T-Summen-Regel	164
4.7	PID-Entwurf nach dem Betragsoptimum	166
4.8	Numerische Optimierung von Reglern	169
4.9	Selbsteinstellende und adaptive Regler	172
5	Regelungen mit unstetigen Reglern	175
5.1	Unstetige Regler ohne Rückführung	175
5.1.1	Zweipunkt-Regler ohne Hysterese	175
5.1.2	Zweipunkt-Regler mit Hysterese	176
5.1.3	Dreipunkt-Regler	188
5.2	Unstetige Regler mit Rückführung	192
5.2.1	Zweipunkt-Regler mit verzögerter Rückführung	192
5.2.2	Zweipunkt-Regler mit verzögert nachgebender Rückführung	195
5.2.3	Dreipunkt-Regler mit verzögerter Rückführung (Schrittregler)	198

6	Vermaschte Regelkreise	203
6.1	Störgrößenaufschaltung.....	203
6.2	Hilfsgrößenaufschaltung.....	207
6.3	Unterlagerte Regelung (Kaskadenregelung).....	208
6.4	Vorfilter und Vorsteuerung.....	210
7	Digitale Regelung	213
7.1	Prinzip der digitalen Regelung.....	213
7.2	Der digitale PID-Regler.....	215
7.3	Einstellregeln für digitale PID-Regler.....	220
8	Reglerentwurf im Frequenzbereich	225
8.1	Frequenzgang linearer Systeme.....	225
8.2	Grafische Darstellung des Frequenzgangs.....	230
8.3	Frequenzgang regelungstechnischer Grundglieder.....	232
8.3.1	P-Glied.....	232
8.3.2	P-T ₁ -Glied.....	234
8.3.3	P-T ₂ S-Glied.....	237
8.3.4	Totzeitglied.....	240
8.3.5	I-Glied.....	242
8.3.6	D-Glied.....	244
8.4	Frequenzgang von Reihenschaltungen.....	246
8.5	Frequenzgang des PID-Reglers.....	250
8.6	Stabilität von Regelkreisen.....	256
8.7	Reglerentwurf.....	262
8.7.1	Phasen- und Amplitudenreserve.....	262
8.7.2	PI-Regler.....	268
8.7.3	PID-Regler.....	270
8.7.4	PD-Regler.....	272
9	Unschärfe Regelung (Fuzzy Control)	275
9.1	Der Mensch als Regler.....	275
9.2	Grundlagen der Fuzzy-Logik.....	277
9.2.1	Fuzzy-Mengen.....	277
9.2.2	Linguistische Variablen und Terme.....	279
9.2.3	Fuzzy-Inferenz.....	280
9.2.4	Defuzzifizierung.....	283
9.2.5	Fuzzy-Inferenz bei mehreren Eingangsgrößen.....	285
9.3	Fuzzy Controller.....	289
9.4	Hybride und adaptive Fuzzy-Regelungssysteme.....	293
9.4.1	Nichtadaptive Systeme mit konventionellem Regler.....	294
9.4.2	Umschaltregelungen mit Fuzzy-Komponente.....	298
9.4.3	Adaptive Konzepte.....	299

10	Realisierung von Reglern	305
10.1	Mechanische Regler	305
10.2	Hydraulische und pneumatische Regler	307
10.3	Analogregler auf Basis von Operationsverstärkern	309
10.3.1	Grundschtaltung zur Realisierung von PID-Reglern	309
10.3.2	Elektronischer P-Regler.....	310
10.3.3	Elektronischer I-Regler	312
10.3.4	Elektronischer PI-Regler	312
10.3.5	Elektronischer PD-Regler.....	313
10.3.6	Elektronischer PID-Regler	313
10.3.7	Schaltende Regler.....	314
10.4	Digitalregler.....	315
10.5	SPS-Regler	322
11	Begleit-Software zum Buch	325
11.1	Installation der Software.....	325
11.2	Programmmodule von WINFACT 2016	326
11.3	Das blockorientierte Simulationssystem BORIS	327
11.3.1	Übersicht	327
11.3.2	Komponenten des BORIS-Hauptfensters	327
11.3.3	Aufbau der Simulationsstruktur.....	329
11.3.4	Steuerung der Simulation	330
11.3.5	Ermittlung von Frequenzgängen	331
11.4	Ermittlung von Frequenzgängen mit LISA	333
11.4.1	Übersicht	333
11.4.2	Einlesen der Daten.....	333
11.4.3	Darstellungsform und Speichern von Ergebnissen.....	334
11.5	Reglerentwurf im Frequenzbereich mit RESY	336
11.5.1	Übersicht	336
11.5.2	Bildschirmaufbau	338
11.5.3	Konfigurierung des Regelkreises.....	339
11.6	Entwurf und Analyse von Fuzzy-Systemen mit FLOP.....	339
11.6.1	Übersicht	339
11.6.2	Linguistische Variablen.....	341
11.6.3	Regelbasis.....	341
11.6.4	Systemanalyse im Debug-Modus	342
12	Anwendungsbeispiel: Drehzahlregelung eines Gleichstromantriebs	345
12.1	Vorstellung der Regelstrecke.....	345
12.1.1	Modellierung des Motors	346
12.1.2	Modellierung des Stromrichters	347
12.1.3	Modellierung des Tachogenerators.....	348
12.1.4	Gesamtstruktur der Regelstrecke.....	348
12.1.5	Sprungantwort und Frequenzgang der Regelstrecke	350
12.2	Reglerentwurf im Zeitbereich.....	352

12.2.1	Schwingversuch nach <i>Ziegler/Nichols</i>	352
12.2.2	Einstellregeln nach <i>Chien, Hrones</i> und <i>Reswick</i>	354
12.2.3	Reglerentwurf nach der T-Summen-Regel	357
12.2.4	Reglerentwurf nach dem Betragsoptimum	358
12.2.5	Numerische Optimierung anhand des IAE-Kriteriums	359
12.2.6	Zweipunkt-Regelung der Gleichstrommaschine	361
12.3	Reglerentwurf im Frequenzbereich	362
12.3.1	Stabilitätsanalyse	362
12.3.2	Entwurf eines PI-Kompensationsreglers	364
12.4	Vergleich der Entwurfsergebnisse	366
Formelzeichen und Benennungen Deutsch - Englisch		369
Literatur		375
Stichwortverzeichnis		379