

# HANSER



## Inhaltsverzeichnis

Heinz Mann, Horst Schiffelgen, Rainer Froriep

Einführung in die Regelungstechnik

Analoge und digitale Regelung, Fuzzy-Regler, Regel-Realisierung,  
Software

ISBN: 978-3-446-41765-6

Weitere Informationen oder Bestellungen unter

<http://www.hanser.de/978-3-446-41765-6>

sowie im Buchhandel.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Einleitung</b>	13
1.1 Erste Orientierung.	13
1.2 Steuerung	14
1.3 Regelung	21
1.4 Weitere Beispiele für Steuerungen und Regelungen	29
1.5 Zur Lösung regelungstechnischer Aufgabenstellungen	35
<b>2 Analoge Übertragungsglieder</b>	41
2.1 Lineare zeitinvariante Übertragungsglieder (LZI-Glieder)	41
2.2 Wirkungsplan und grafische Simulationsprogramme	47
2.3 Mathematische Modellbildung	51
2.3.1 Theoretische Modellbildung (mit Linearisierung)	51
2.3.2 Experimentelle Modellbildung (Identifikation)	61
2.3.3 Normierung von mathematischen Modellen	67
2.4 Testsignalantworten und zugehörige Kennfunktionen	68
2.4.1 Sprungantwort und Einheitssprungantwort	69
2.4.2 Impulsantwort und Einheitsimpulsantwort	71
2.4.3 Anstiegsantwort und Einheitsanstiegsantwort	73
2.5 Frequenzgang	75
2.5.1 Berechnung des Frequenzgangs	75
2.5.2 Bode-Diagramm (Frequenzkennlinien) und Ortskurve	77
2.6 Übertragungsfunktion	80
2.6.1 Übertragungsfunktion und Differenzialgleichung	81
2.6.2 Verknüpfung von LZI-Gliedern	82
2.6.3 Übertragungsfunktion und andere Kennfunktionen	87
2.6.4 Pole und Nullstellen (P-N-Plan)	89
2.7 Stabilität	91
2.7.1 Zum Begriff der Stabilität	92
2.7.2 Grundlegendes Stabilitätskriterium für LZI-Glieder	93
2.7.3 Hurwitz-Kriterium	98
2.8 Einfache LZI-Glieder	99
2.8.1 P-Glied	99
2.8.2 P-T <sub>1</sub> -Glied	101
2.8.3 P-T <sub>2</sub> -Glied	104
2.8.4 T <sub>t</sub> -Glied	108
2.8.5 I- und I-T <sub>1</sub> -Glied	110
2.8.6 D- und D-T <sub>1</sub> -Glied	112
2.8.7 Übersicht	114

<b>3 Regelstrecken . . . . .</b>	116
3.1 Einteilung der Regelstrecken . . . . .	118
3.2 Regelstrecken mit Ausgleich . . . . .	120
3.2.1 Regelstrecken mit Ausgleich und ohne Verzögerung . . . . .	120
3.2.2 Regelstrecken mit Ausgleich und Verzögerung 1. Ordnung . . . . .	121
3.2.3 Regelstrecken mit Ausgleich und Verzögerung höherer Ordnung . . . . .	124
3.3 Regelstrecken ohne Ausgleich . . . . .	130
3.3.1 Regelstrecken ohne Ausgleich und ohne Verzögerung . . . . .	130
3.3.2 Regelstrecken ohne Ausgleich und mit Verzögerung . . . . .	132
3.4 Regelstrecken mit Totzeit . . . . .	134
3.5 Regelbarkeit von Strecken . . . . .	136
<b>4 Analoge Regler . . . . .</b>	138
4.1 Einteilung der Regler . . . . .	138
4.2 Stetige Regler . . . . .	140
4.2.1 P-Regler . . . . .	141
4.2.2 I-Regler . . . . .	147
4.2.3 PI-Regler . . . . .	150
4.2.4 PD-Regler . . . . .	153
4.2.5 PID-Regler . . . . .	156
4.2.6 Bleibende Regeldifferenzen, Genauigkeit . . . . .	158
4.2.7 Unempfindliche Reglerrealisierung . . . . .	159
4.3 Unstetige Regler . . . . .	161
4.3.1 Zweipunktregler an Strecken mit Ausgleich . . . . .	163
4.3.2 Zweipunktregler an Strecken ohne Ausgleich . . . . .	168
4.3.3 Zweipunktregler mit stetiger Rückführung . . . . .	170
4.3.4 Dreipunktregler mit stetiger Rückführung . . . . .	172
<b>5 Analoger Regelkreis . . . . .</b>	175
5.1 Anforderungen an das Führungs- und Störverhalten . . . . .	176
5.2 Standard-Konfigurationen von Strecke und Regler . . . . .	179
5.3 Frequenzgang des offenen Regelkreises . . . . .	180
5.3.1 Stabilitätsanalyse anhand der Ortskurve . . . . .	180
5.3.2 Stabilitätsanalyse anhand der Frequenzkennlinien . . . . .	187
5.3.3 Frequenzkennlinien als Entwurfswerkzeug (FKL-Verfahren) . . . . .	191
5.4 Wurzelortskurven (WOK-Verfahren) . . . . .	201
5.5 Einstellverfahren . . . . .	209
5.5.1 Optimierung der Reglerparameter . . . . .	210
5.5.2 Einstellregeln . . . . .	214
5.6 Vermischte Regelkreise . . . . .	218
5.6.1 Regelkreis mit Störgrößenaufschaltung . . . . .	218
5.6.2 Regelkreis mit Hilfsregelgrößen-Aufschaltung . . . . .	221

5.6.3 Unterlagerte Regelkreise (Kaskadenregelung) . . . . .	224
5.6.4 Regelkreis mit Störgrößenregelung . . . . .	225
5.6.5 Mehrgrößenregelungen . . . . .	226
5.7 Regeleinrichtung mit Strukturumschaltung („Anfahren“ von Regelkreisen)	227
5.8 Selbsteinstellende (adaptive) Regelkreise . . . . .	228
5.9 Nichtlineare Regelkreise . . . . .	229
<b>6 Digitale Reglerrealisierung (DDC) . . . . .</b>	<b>234</b>
6.1 Überblick . . . . .	234
6.2 Funktionseinheiten einer digitalen Regeleinrichtung . . . . .	236
6.2.1 Analog-Digital-Umsetzung . . . . .	236
6.2.2 Digitaler Regler . . . . .	239
6.2.3 Digital-Analog-Umsetzung . . . . .	240
6.2.4 Annahmen beim Berechnungsmodell des digitalen Reglers . . . . .	241
6.3 Digitaler PID-Regler. . . . .	241
6.3.1 P-Anteil . . . . .	242
6.3.2 I-Anteil . . . . .	243
6.3.3 D-Anteil . . . . .	245
6.3.4 Stellungs- und Geschwindigkeitsalgorithmus . . . . .	245
6.4 Berechnung weiterer Regelalgorithmen . . . . .	249
<b>7 Digitales Berechnungsmodell der Regelstrecke . . . . .</b>	<b>254</b>
7.1 Einführung . . . . .	254
7.2 Digital-Analog-Umsetzung und $z$ -Transformation . . . . .	255
7.3 Diskretisierungsverfahren . . . . .	260
7.4 Diskretisierungsbeispiele . . . . .	262
7.4.1 Strecke mit Ausgleich und Verzögerung 1. Ordnung . . . . .	263
7.4.2 Strecke mit Ausgleich und Verzögerung 2. Ordnung . . . . .	264
7.4.3 Strecke ohne Ausgleich und Verzögerung 1. Ordnung . . . . .	268
<b>8 Digitale Übertragungsglieder . . . . .</b>	<b>271</b>
8.1 Digitale LZI-Glieder . . . . .	271
8.2 Testsignalantworten und zugehörige Kennfunktionen . . . . .	272
8.3 $z$ -Übertragungsfunktion . . . . .	277
8.4 Wirkungsplan und grafische Programmierung . . . . .	282
8.5 Stabilität . . . . .	283
<b>9 Digitaler Regelkreis . . . . .</b>	<b>288</b>
9.1 Zur Wahl der Abtastperiode bei digital realisierten Reglern . . . . .	289
9.2 Einstellverfahren, Einstellregeln . . . . .	295

<b>10 Fuzzy-Regler (Fuzzy-Controller)</b> . . . . .	298
10.1 Einordnung . . . . .	298
10.2 Regelbasis, linguistische Größe und Fuzzy-Menge . . . . .	299
10.3 Fuzzy-logische Operationen . . . . .	305
10.4 Informationsverarbeitung im Fuzzy-Regler . . . . .	306
10.4.1 Fuzzifizierung der Regeldifferenz . . . . .	307
10.4.2 Bestimmung des Erfüllungsgrades jeder Regel . . . . .	308
10.4.3 Ermittlung der Stellgrößen-Fuzzy-Menge jeder Regel . . . . .	310
10.4.4 Bestimmung der resultierenden Stellgrößen-Fuzzy-Menge . . . . .	311
10.4.5 Defuzzifizierung der Stellgröße . . . . .	312
10.5 Kennlinien von Fuzzy-Reglern . . . . .	313
10.6 Fuzzy-PID-Regler . . . . .	317
<b>11 Regelungstechnische Baueinheiten</b> . . . . .	320
11.1 Mess- und Übertragungseinrichtungen . . . . .	320
11.1.1 Sensoren . . . . .	320
11.1.2 Umformer, Wandler . . . . .	322
11.1.3 Signalübertragung . . . . .	325
11.2 Verstärker und analoge Regler . . . . .	328
11.2.1 Elektrische Verstärker und Regler . . . . .	328
11.2.1.1 Elektrische Verstärker . . . . .	328
11.2.1.2 Elektrische Regler . . . . .	336
11.2.1.3 Rechenglieder . . . . .	338
11.2.2 Pneumatische Verstärker und Regler . . . . .	342
11.2.2.1 Pneumatische Verstärker . . . . .	343
11.2.2.2 Pneumatische Regler . . . . .	345
11.2.3 Hydraulische Verstärker und Regler . . . . .	349
11.2.3.1 Hydraulische Verstärker . . . . .	350
11.2.3.2 Hydraulische Regler . . . . .	351
11.3 Einrichtungen zur direkten digitalen Regelung (DDC) . . . . .	353
11.3.1 Analog-Digital-Umsetzung . . . . .	353
11.3.2 Prozessrechner . . . . .	357
11.3.2.1 Hardware . . . . .	357
11.3.2.2 Software, Programmierung . . . . .	360
11.3.3 Digital-Analog-Umsetzung . . . . .	364
11.4 Stellglieder und Stellantriebe . . . . .	365
11.4.1 Stellglieder . . . . .	365
11.4.1.1 Elektrische Stellglieder . . . . .	365
11.4.1.2 Stellventile . . . . .	365
11.4.1.3 Drosselklappen . . . . .	370
11.4.2 Stellantriebe . . . . .	370
11.4.2.1 Elektrische Stellmotoren . . . . .	370
11.4.2.2 Pneumatische Stellmotoren . . . . .	377

<i>Inhaltsverzeichnis</i>	11
11.4.2.3 Hydraulische Stellmotoren . . . . .	378
11.4.2.4 Kombinierte Stellmotoren . . . . .	381

## Anhang

A.1 Einstieg in Matlab/Simulink . . . . .	384
A.2 Anwendungen der komplexen Rechnung . . . . .	391
A.3 Anwendungen der Laplace-Transformation . . . . .	395
A.4 Anwendungen der $z$ -Transformation . . . . .	402
A.5 Skizzieren von Frequenzkennlinien (Bode-Diagramm) . . . . .	410
<b>Ergänzende und weiterführende Literatur</b> . . . . .	418
<b>Literatur zu Matlab/Simulink</b> . . . . .	420
<b>Normen und Richtlinien</b> . . . . .	421
<b>Formelzeichen</b> . . . . .	423
<b>Glossar</b> . . . . .	427
<b>Sachwortverzeichnis</b> . . . . .	433