



## 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>1</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 Analoges 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 Vermaschte 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</b>	<b>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</b>	<b>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</b>	<b>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</b>	<b>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

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>	<b>418</b>
--	------------

<b>Literatur zu Matlab/Simulink . . . . .</b>	<b>420</b>
---	------------

<b>Normen und Richtlinien . . . . .</b>	<b>421</b>
---	------------

<b>Formelzeichen . . . . .</b>	<b>423</b>
--------------------------------	------------

<b>Glossar . . . . .</b>	<b>427</b>
--------------------------	------------

<b>Sachwortverzeichnis . . . . .</b>	<b>433</b>
--------------------------------------	------------