

HANSER

# Einführung in die Regelungstechnik

Heinz Mann, Horst Schiffelgen, Rainer  
Froriep

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

ISBN 3-446-40303-5

Inhaltsverzeichnis

Weitere Informationen oder Bestellungen unter  
<http://www.hanser.de/3-446-40303-5> 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 Übergangsfunktion	69
2.4.2 Impulsantwort und Gewichtsfunktion	71
2.4.3 Anstiegsantwort und bezogene Anstiegsantwort	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 . . . . .	117
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 Regeleinrichtungen</b> . . . . .	138
4.1 Einteilung der Regeleinrichtungen . . . . .	138
4.2 Unstetige Regeleinrichtungen . . . . .	140
4.2.1 Zweipunktregler . . . . .	140
4.2.2 Regelkreise mit Zweipunktreglern . . . . .	141
4.2.2.1 Zweipunktregler an Regelstrecken mit Ausgleich . . . . .	141
4.2.2.2 Zweipunktregler an Regelstrecken ohne Ausgleich . . . . .	148
4.2.2.3 Zweipunktregler mit Rückführung . . . . .	151
4.2.3 Dreipunktregler . . . . .	154
4.2.3.1 Dreipunktregler mit Transistor-Schaltverstärker . . . . .	155
4.2.3.2 Dreipunktregler mit Rückführung . . . . .	156
4.3 Stetige Regeleinrichtungen . . . . .	159
4.3.1 Proportional wirkende Regler (P-Regler) . . . . .	160
4.3.2 Integral wirkende Regler (I-Regler) . . . . .	163
4.3.3 Proportional-integral wirkende Regler (PI-Regler) . . . . .	164
4.3.4 Regler mit Vorhalt (PD- und PID-Regler) . . . . .	165
4.3.5 Vergleich der stetigen Regler . . . . .	168
4.3.6 Realisierung stetiger Regeleinrichtungen mittels innerer Rückführung . . . . .	171
4.3.6.1 Verstärker mit starrer Rückführung (P-Regler) . . . . .	172
4.3.6.2 Verstärker mit nachgebender Rückführung (I- und PI-Regler) . . . . .	174
4.3.6.3 Verstärker mit verzögerter Rückführung (PD-Regler) . . . . .	174
4.3.6.4 Verstärker mit verzögerter und nachgebender Rückführung (PID-Regler) . . . . .	175
4.4 Auswahlgesichtspunkte . . . . .	178
<b>5 Analoger Regelkreis</b> . . . . .	179
5.1 Anforderungen an das Führungs- und Störverhalten . . . . .	180
5.2 Standard-Konfigurationen von Strecke und Regler . . . . .	183
5.3 Frequenzgang des offenen Regelkreises . . . . .	184
5.3.1 Stabilitätsanalyse anhand der Ortskurve . . . . .	184
5.3.2 Stabilitätsanalyse anhand der Frequenzkennlinien . . . . .	191
5.3.3 Frequenzkennlinien als Entwurfswerkzeug (FKL-Verfahren) . . . . .	195

5.4	Wurzelortskurven (WOK-Verfahren) . . . . .	205
5.5	Einstellverfahren . . . . .	213
5.5.1	Optimierung der Reglerparameter . . . . .	214
5.5.2	Einstellregeln . . . . .	218
5.6	Vermaschte Regelkreise . . . . .	222
5.6.1	Regelkreis mit Störgrößenaufschaltung . . . . .	222
5.6.2	Regelkreis mit Hilfsregelgrößen-Aufschaltung . . . . .	225
5.6.3	Unterlagerte Regelkreise (Kaskadenregelung) . . . . .	228
5.6.4	Regelkreis mit Störgrößenregelung . . . . .	229
5.6.5	Mehrgrößenregelungen . . . . .	230
5.7	Regeleinrichtung mit Strukturumschaltung („Anfahren“ von Regelkreisen) .	231
5.8	Selbsteinstellende (adaptive) Regelkreise . . . . .	232
5.9	Nichtlineare Regelkreise . . . . .	233
<b>6</b>	<b>Digitale Reglerrealisierung (DDC)</b> . . . . .	<b>238</b>
6.1	Überblick . . . . .	238
6.2	Funktionseinheiten einer digitalen Regeleinrichtung . . . . .	240
6.2.1	Analog-Digital-Umsetzung . . . . .	240
6.2.2	Digitaler Regler . . . . .	243
6.2.3	Digital-Analog-Umsetzung . . . . .	244
6.2.4	Annahmen beim Berechnungsmodell des digitalen Reglers . . . . .	245
6.3	Digitaler PID-Regler. . . . .	245
6.3.1	P-Anteil . . . . .	246
6.3.2	I-Anteil . . . . .	247
6.3.3	D-Anteil . . . . .	249
6.3.4	Stellungs- und Geschwindigkeitsalgorithmus . . . . .	249
6.4	Berechnung weiterer Regelalgorithmen . . . . .	253
<b>7</b>	<b>Digitales Berechnungsmodell der Regelstrecke.</b> . . . . .	<b>258</b>
7.1	Einführung . . . . .	258
7.2	Digital-Analog-Umsetzung und z-Transformation . . . . .	259
7.3	Diskretisierungsverfahren . . . . .	264
7.4	Diskretisierungsbeispiele . . . . .	266
7.4.1	Strecke mit Ausgleich und Verzögerung 1. Ordnung . . . . .	267
7.4.2	Strecke mit Ausgleich und Verzögerung 2. Ordnung . . . . .	268
7.4.3	Strecke ohne Ausgleich und Verzögerung 1. Ordnung . . . . .	272
<b>8</b>	<b>Digitale Übertragungsglieder</b> . . . . .	<b>275</b>
8.1	Digitale LZI-Glieder. . . . .	275
8.2	Testsignalantworten und zugehörige Kennfunktionen . . . . .	276
8.3	z-Übertragungsfunktion . . . . .	281

8.4 Wirkungsplan und grafische Programmierung . . . . .	286
8.5 Stabilität . . . . .	287
<b>9 Digitaler Regelkreis . . . . .</b>	<b>292</b>
9.1 Anforderungen an das Führungs- und Störverhalten . . . . .	293
9.2 Zur Wahl der Abtastperiode bei digital realisierten Reglern . . . . .	295
9.3 Einstellverfahren, Einstellregeln . . . . .	301
<b>10 Fuzzy-Regler (Fuzzy-Controller) . . . . .</b>	<b>304</b>
10.1 Einordnung . . . . .	304
10.2 Regelbasis, linguistische Größe und Fuzzy-Menge . . . . .	305
10.3 Fuzzy-logische Operationen . . . . .	311
10.4 Informationsverarbeitung im Fuzzy-Regler . . . . .	312
10.4.1 Fuzzifizierung der Regeldifferenz . . . . .	313
10.4.2 Bestimmung des Erfüllungsgrades jeder Regel . . . . .	314
10.4.3 Ermittlung der Stellgrößen-Fuzzy-Menge jeder Regel . . . . .	316
10.4.4 Bestimmung der resultierenden Stellgrößen-Fuzzy-Menge . . . . .	317
10.4.5 Defuzzifizierung der Stellgröße . . . . .	318
10.5 Kennlinien von Fuzzy-Reglern . . . . .	319
10.6 Fuzzy-PID-Regler . . . . .	323
<b>11 Regelungstechnische Baueinheiten . . . . .</b>	<b>326</b>
11.1 Mess- und Übertragungseinrichtungen . . . . .	326
11.1.1 Sensoren . . . . .	326
11.1.2 Umformer, Wandler . . . . .	328
11.1.3 Signalübertragung . . . . .	331
11.2 Verstärker und analoge Regler . . . . .	334
11.2.1 Elektrische Verstärker und Regler . . . . .	334
11.2.1.1 Elektrische Verstärker . . . . .	334
11.2.1.2 Elektrische Regler . . . . .	342
11.2.1.3 Rechenglieder . . . . .	346
11.2.2 Pneumatische Verstärker und Regler . . . . .	350
11.2.2.1 Pneumatische Verstärker . . . . .	351
11.2.2.2 Pneumatische Regler . . . . .	353
11.2.3 Hydraulische Verstärker und Regler . . . . .	357
11.2.3.1 Hydraulische Verstärker . . . . .	358
11.2.3.2 Hydraulische Regler . . . . .	359
11.3 Einrichtungen zur direkten digitalen Regelung (DDC) . . . . .	361
11.3.1 Analog-Digital-Umsetzung . . . . .	361
11.3.2 Prozessrechner . . . . .	365
11.3.2.1 Hardware . . . . .	365
11.3.2.2 Software, Programmierung . . . . .	368
11.3.3 Digital-Analog-Umsetzung . . . . .	372

11.4 Stellglieder und Stellantriebe . . . . .	373
11.4.1 Stellglieder . . . . .	373
11.4.1.1 Elektrische Stellglieder . . . . .	373
11.4.1.2 Stellventile . . . . .	374
11.4.1.3 Drosselklappen . . . . .	378
11.4.2 Stellantriebe . . . . .	378
11.4.2.1 Elektrische Stellmotoren . . . . .	378
11.4.2.2 Pneumatische Stellmotoren . . . . .	385
11.4.2.3 Hydraulische Stellmotoren . . . . .	386
11.4.2.4 Kombinierte Stellmotoren . . . . .	389

## **Anhang**

A.1 Einstieg in Matlab/Simulink . . . . .	392
A.2 Anwendungen der komplexen Rechnung. . . . .	399
A.3 Anwendungen der Laplace-Transformation . . . . .	403
A.4 Anwendungen der $z$ -Transformation . . . . .	410
A.5 Skizzieren von Frequenzkennlinien (Bode-Diagramm) . . . . .	418

<b>Ergänzende und weiterführende Literatur</b> . . . . .	426
--	-----

<b>Literatur zu Matlab/Simulink</b> . . . . .	428
---	-----

<b>Normen und Richtlinien</b> . . . . .	429
---	-----

<b>Formelzeichen</b> . . . . .	431
--------------------------------	-----

<b>Glossar</b> . . . . .	435
--------------------------	-----

<b>Sachwortverzeichnis</b> . . . . .	441
--------------------------------------	-----