

Werner Leonhard

Einführung in die Regelungstechnik

Lineare und nichtlineare Regelvorgänge

für Elektrotechniker, Physiker
und Maschinenbauer
ab 5. Semester

2., verbesserte Auflage

Mit 378 Bildern



Friedr. Vieweg & Sohn Braunschweig/Wiesbaden

Inhaltsverzeichnis

Teil I Lineare Regelvorgänge

1. Aufgabenstellung der Regelungstechnik	
1.1. Allgemeines	1
1.2. Erläuterung der Aufgabenstellung anhand von Beispielen	2
1.2.1. Regelung eines Nachrichtenkanals	3
1.2.2. Raumheizung	5
1.2.3. Kursregelung eines Schiffes	7
1.3. Stabilitätsproblem	10
2. Analytische Beschreibung des dynamischen Verhaltens einer Regelstrecke	
2.1. Übertragungselement, Blockschaltbild	13
2.2. Normierung und Linearisierung	16
3. Dynamisches Verhalten einfacher Übertragungselemente	
3.1. Proportionalglied und Verzögerung 1. Ordnung (PT_1)	19
3.1.1. Fremderregter Gleichstromgenerator	19
3.1.2. Weitere Beispiele	22
3.1.3. Allgemeine Differentialgleichung 1. Ordnung	23
3.2. Proportionalglied mit Verzögerung höherer Ordnung	26
3.2.1. Übertragungselement 2. Ordnung (PT_2)	26
3.2.2. Weitere Beispiele	28
3.2.3. Proportionalglied mit Verzögerung höherer Ordnung (PT_nD_m)	29
3.3. Integrierende Übertragungselemente	29
3.3.1. Integrator (I)	29
3.3.2. Verzögerter Integrator (IT_1)	31
3.3.3. Doppelter Integrator (I_2)	32
3.4. Laufzeitglied	33
4. Berechnung der Systemantwort bei verschiedenen Anregungsfunktionen	
4.1. Impulsfunktion und Impulsantwort	35
4.2. Anstiegsfunktion (Rampe) und Anstiegsantwort	37
4.3. Berechnung der Antwort einer linearen Übertragungsstrecke bei beliebigem Verlauf der Anregungsfunktion	39
4.4. Anstiegsfehler und Steuerfläche	41
4.4.1. Anstiegsfehler	41
4.4.2. Steuerfläche (Regelfläche)	43
5. Die Übertragungsfunktion	
5.1. Eigenschaften und komplexe Darstellung rationaler Funktionen	44
5.1.1. Pole und Nullstellen	44
5.1.2. Abbildung durch ein Polynom	46
5.1.3. Abbildung durch ein reziprokes Polynom	50
5.1.4. Gebrochene rationale Funktion	52

5.2.	Logarithmische Frequenzkennlinien	54
5.2.1.	Bode-Diagramm	54
5.2.2.	Beispiel	61
6.	Gegenkopplung und Regelung	
6.1.	Rückkopplung	64
6.2.	Beispiele	66
6.2.1.	Magnetischer Gleichstromverstärker	66
6.2.2.	Elektronischer Rechenverstärker mit frequenzabhängiger Gegenkopplung	71
6.2.3.	Hydraulischer Stellmotor mit „Rückführung“	76
6.3.	Stabilität	77
7.	Stabilität eines Regelkreises	
7.1.	Stabilität und Dämpfung	80
7.2.	Numerische Stabilitätskriterien	83
7.3.	Graphische Stabilitätsprüfung anhand der charakteristischen Gleichung	85
7.3.1.	Phasenintegral	85
7.3.2.	$N_g(p)$ ist Polynom	87
7.3.3.	$N_g(p)$ ist eine spezielle ganze Funktion	90
7.4.	Stabilitätsprüfung anhand der Ortskurve des Kreisfrequenzganges (Nyquist)	92
7.5.	Beispiele zum Nyquist-Kriterium, Sonderfälle	94
7.5.1.	Proportional wirkender Kreis	94
7.5.2.	Integrierender Kreis	95
7.5.3.	Bedingt stabile Regelung	96
7.5.4.	Instabilität im offenen Kreis	97
8.	Anwendung des Nyquist-Kriteriums zur Festlegung freier Regler-Parameter	
8.1.	Betrags- und Phasenabstand	101
8.2.	Übertragung in das Bode-Diagramm	106
8.3.	Allgemeine Gesichtspunkte für den Entwurf eines Regelkreises	108
9.	Funktionsbausteine für Regler und Regelstrecken	
9.1.	Minimalphasen-Funktionen	113
9.1.1.	Pole	113
9.1.2.	Nullstellen	114
9.1.3.	Zusammenhang zwischen Betrag und Phase	115
9.2.	Nicht-Minimalphasen-Funktionen	117
9.2.1.	Allpaß-Funktion 1. Ordnung	117
9.2.2.	Allpaß-Funktion 2. Ordnung	120
9.2.3.	Allpaß-Funktion höherer Ordnung, Laufzeitglied	122
10.	Regelung mit proportional wirkendem Regler (P)	
10.1.	Definition	123
10.2.	Verwirklichung	124

10.2.1.	Elektrische Regler	124
10.2.2.	Elektromechanische Regler	127
10.2.3.	Pneumatische Regler	128
10.3.	Anwendung	129
10.3.1.	Berechnung eines Regelkreises 2. Ordnung	129
10.3.2.	Berechnung eines Regelkreises 3. Ordnung	131
11.	Regelung durch einen Proportionalregler mit Vorhalt (PD)	
11.1.	Definition	135
11.2.	Verwirklichung	136
11.3.	Anwendung	138
11.3.1.	„Kompensation“ einer Verzögerung	138
11.3.2.	Regelstrecke 2. Ordnung	140
11.3.3.	Regelstrecke 3. Ordnung	141
12.	Regelung mit einem Integralregler (I)	
12.1.	Definition	145
12.2.	Verwirklichung	146
12.2.1.	Elektronischer Integrator	146
12.2.2.	Andere Integratoren	147
12.3.	Anwendung	149
12.3.1.	Regelkreis 2. Ordnung	149
12.3.2.	Regelkreis höherer Ordnung	151
13.	Regelkreis mit Proportional-Integral-Regler (PI)	
13.1.	Definition	153
13.2.	Verwirklichung	154
13.3.	Anwendung	155
13.3.1.	Proportional wirkende Regelstrecke 2. Ordnung	156
13.3.2.	Verzögerter Integrator als Regelstrecke	157
13.3.3.	Regelstrecke 3. Ordnung	161
14.	Regelung mit Proportional-Integral-Differential-Regler (PID)	
14.1.	Definition	164
14.2.	Verwirklichung	166
14.3.	Anwendung	167
14.3.1.	Regelstrecke 3. Ordnung	167
14.3.2.	Regelung einer ungedämpften schwingungsfähigen Regelstrecke	171
14.4.	Andere Regler und Entwurfsverfahren	175
15.	Wahl des Reglers für eine Tiefpaß-Regelstrecke höherer Ordnung	
15.1.	Tiefpaß und Ersatzzeitkonstante	177
15.2.	Anwendung der Näherung	179
15.2.1.	Die Regelstrecke enthält nur die Ersatzfunktion	179
15.2.2.	Die Regelstrecke enthält außer der Ersatzfunktion definierte Verzögerungen	181

16. Regelkreis mit Rückführung

16.1.	Wirkungsweise	182
16.2.	Ausführungsbeispiele	184
16.3.	Ergänzende Rückführung	185

17. Kaskadenregelung

17.1.	Umwandlung des Blockschaltbildes	187
17.2.	Eigenschaften einer Kaskadenregelung	188
17.3.	Näherungsweise Berechnung einer einfachen Kaskadenregelung	190
17.4.	Verallgemeinerung	191
17.4.1.	Unterteilung der Regelstrecke	191
17.4.2.	Integrierende Regelstrecke	192
17.4.3.	Andere Struktur der Regelstrecke	193
17.5.	Stabilität einer Kaskadenregelung	196
17.5.1.	Übertragungsfunktion	196
17.5.2.	Berechnung der Stabilitätsgrenze für einen Sonderfall	197
17.6.	Beispiel einer Kaskadenregelung	198

18. Störgrößen-Aufschaltung

18.1.	Steuerung mit Störgrößen-Aufschaltung	201
18.2.	Regelung mit Störgrößen-Aufschaltung	203
18.3.	Regelung mit Vorsteuerung	205
18.3.1.	Statische Vorsteuerung	205
18.3.2.	Dynamische Vorsteuerung	206

19. Mehrgrößen-Regelung

19.1.	Aufgabenstellung	210
19.2.	Übertragungsfunktionen und Blockschaltbild einer linearen Zweigrößen-Regelung	212
19.3.	Entkoppelte Zweigrößen-Regelung	215
19.3.1.	Entkopplung	215
19.3.2.	Beispiel einer Durchfluß- und Mischungsregelung	217

Teil II Nichtlineare Regelvorgänge

20. Stellglied mit zweiwertiger unstetiger Kennlinie	221
20.1. Verwendung eines Schaltelementes als Stellglied	221
20.2. Linearisierung eines Schaltgliedes durch periodische Betätigung	223
20.3. Zweipunktregler	233
20.3.1. Beschreibung der Wirkungsweise des Zweipunktreglers anhand eines Beispiels	233
20.3.2. Anwendung	238
21. Stellglied mit dreiwertiger unstetiger Kennlinie	245
21.1. Dreipunktschalter und Integrator	245
21.2. Linearisierung durch periodisches Schalten	246
21.3. Dreipunktregler mit minimaler Schalthäufigkeit	249
21.3.1. Dreipunktregler ohne Rückführung	250
21.3.2. Dreipunktregler mit ergänzender Rückführung	252
22. Darstellung von Regelvorgängen durch Zustandskurven	257
22.1. Zustandsgrößen und Zustandsraum	257
22.2. Ebene Zustandskurven	266
22.2.1. System 1. Ordnung	266
22.2.2. Zustandskurven eines zweifachen Integrators	267
22.2.3. Zustandskurven eines verzögerten Integrators	270
22.2.4. Periodisch gedämpftes Proportionalglied 2. Ordnung	272
22.2.5. Aperiodisch gedämpftes Proportionalglied 2. Ordnung	274
23. Beschreibung der Wirkungsweise unstetiger Regler anhand des Zustandsdiagrammes	278
23.1. Beschleunigungsstrecke mit Zweipunktregler	278
23.1.1. Idealer Zweipunktregler	278
23.1.2. Idealer Zweipunktregler mit Rückführung	280
23.1.3. Zweipunktregler mit Hysterese	282
23.1.4. Zweipunktregler mit Hysterese und Rückführung	284
23.2. Beschleunigungsstrecke mit Dreipunktregler	285
23.2.1. Dreipunktregler mit Hysterese	285
23.2.2. Dreipunktregler mit Hysterese und Rückführung	286
23.3. Allgemeine Regelstrecke 2. Ordnung mit Zweipunktregler	287
23.4. Verzögerter Integrator mit Dreipunktregler	288
24. Zeitlich optimale Regelung	292
24.1. Aufgabenstellung	292
24.2. Kürzester Regelvorgang, optimale Schaltkurve	293
24.2.1. Regelstrecke 1. Ordnung	293
24.2.2. Regelstrecke 2. Ordnung	294
24.2.3. Regelstrecke höherer Ordnung	299
24.3. Integrierende Regelstrecke 2. Ordnung mit Begrenzung von Geschwindigkeit und Lage	301

25. Näherungsweise Stabilitätsprüfung eines nichtlinearen Systems mit Hilfe der Beschreibungsfunktion	305
25.1. Die Beschreibungsfunktion	305
25.2. Lineare Kennlinie mit begrenztem Aussteuerbereich	308
25.3. Lineare Kennlinie mit Unempfindlichkeitszone und begrenztem Aussteuerbereich	313
25.4. Zweipunktregler mit Hysterese	315
25.5. Dreipunktregler mit Hysterese	319
26. Weitere Stabilitätskriterien für nichtlineare Regelsysteme	321
26.1. Allgemeine nichtlineare Kennlinie, Popow-Kriterium	321
26.2. Stabilitätsuntersuchung mit Hilfe der Methode von Ljapunow	327
Anhang: Formeln zur Laplace Transformation	333
Literatur	336
Sachwortverzeichnis	339