

Inhalt

Inhaltsübersicht zu Band II und Band III	xvii
1 Einführung in die Problemstellung der Regelungstechnik	1
1.1 Einordnung der Regelungstechnik	1
1.2 Systembeschreibung mittels Blockschaltbild	2
1.3 Steuerung und Regelung	5
1.4 Prinzipielle Funktionsweise einer Regelung	7
1.5 Die Grundstruktur von Regelkreisen	11
1.6 Einige typische Beispiele für Regelungen	13
1.6.1 Spannungsregelung	13
1.6.2 Kursregelung	14
1.6.3 Füllstandsregelung	15
1.6.4 Regelung eines Wärmetauschers	15
1.7 Historischer Hintergrund	16
2 Einige wichtige Eigenschaften von Regelsystemen	21
2.1 Mathematische Modelle	21
2.2 Dynamisches und statisches Verhalten von Systemen	22
2.3 Systemeigenschaften	23
2.3.1 Lineare und nichtlineare Systeme	23
2.3.2 Systeme mit konzentrierten oder verteilten Parametern	28
2.3.3 Zeitvariante und zeitinvariante Systeme	29
2.3.4 Systeme mit kontinuierlicher oder diskreter Arbeitsweise	29
2.3.5 Systeme mit deterministischen oder stochastischen Variablen	30
2.3.6 Kausale und nichtkausale Systeme	31
2.3.7 Stabile und instabile Systeme	31
2.3.8 Eingrößen- und Mehrgrößensysteme	31

3	Beschreibung linearer kontinuierlicher Systeme im Zeitbereich	33
3.1	Beschreibung mittels Differentialgleichungen	33
3.1.1	Elektrische Systeme	33
3.1.2	Mechanische Systeme	35
3.1.3	Thermische Systeme	37
3.2	Systembeschreibung mittels spezieller Ausgangssignale	42
3.2.1	Die Übergangsfunktion (Sprungantwort)	42
3.2.2	Die Gewichtsfunktion (Impulsantwort)	43
3.2.3	Das Faltungsintegral (Duhamelsches Integral)	45
3.3	Zustandsraumdarstellung	47
3.3.1	Zustandsraumdarstellung für Eingrößensysteme	47
3.3.2	Zustandsraumdarstellung für Mehrgrößensysteme	49
4	Beschreibung linearer kontinuierlicher Systeme im Frequenzbereich	51
4.1	Die Laplace-Transformation	51
4.1.1	Definition und Konvergenzbereich	51
4.1.2	Die Korrespondenztabelle für die Laplace-Transformation	53
4.1.3	Haupteigenschaften der Laplace-Transformation	55
4.1.4	Die inverse Laplace-Transformation	60
4.1.5	Die Lösung von linearen Differentialgleichungen mit Hilfe der Laplace-Transformation	64
4.1.6	Laplace-Transformation der Impulsfunktion $\delta(t)$	69
4.2	Die Übertragungsfunktion	71
4.2.1	Definition und Herleitung	71
4.2.2	Pole und Nullstellen der Übertragungsfunktion	72
4.2.3	Das Rechnen mit Übertragungsfunktionen	73
4.2.4	Herleitung von $G(s)$ aus der Zustandsraumdarstellung	76
4.2.5	Die Übertragungsfunktion bei Systemen mit verteilten Parametern	78
4.2.6	Die Übertragungsmatrix	80
4.2.7	Die komplexe G -Ebene	80
4.3	Die Frequenzgangdarstellung	83
4.3.1	Definition	83

4.3.2	Ortskurvendarstellung des Frequenzganges	85
4.3.3	Darstellung des Frequenzganges durch Frequenzkennlinien (Bode-Diagramm)	86
4.3.4	Die Zusammenstellung der wichtigsten Übertragungsglieder	89
4.3.4.1	Das proportional wirkende Übertragungsglied (P-Glied)	89
4.3.4.2	Das integrierende Übertragungsglied (I-Glied)	90
4.3.4.3	Das differenzierende Übertragungsglied (D-Glied)	90
4.3.4.4	Das Verzögerungsglied 1. Ordnung	91
4.3.4.5	Das proportional-differenzierend wirkende Übertragungsglied (PD-Glied)	95
4.3.4.6	Das Vorhaltglied (DT_1 -Glied)	95
4.3.4.7	Das Verzögerungsglied 2. Ordnung (PT_2 -Glied und PT_2S -Glied)	98
4.3.4.8	Weitere Übertragungsglieder	106
4.3.4.9	Bandbreite eines Übertragungsgliedes	106
4.3.4.10	Beispiel für die Konstruktion des Bode-Diagramms	110
4.3.5	Systeme mit minimalem und nichtminimalem Phasenverhalten	111
5	Das Verhalten linearer kontinuierlicher Regelsysteme	117
5.1	Dynamisches Verhalten des Regelkreises	117
5.2	Stationäres Verhalten des Regelkreises	119
5.2.1	Übertragungsfunktion $G_0(s)$ mit verzögertem P-Verhalten	121
5.2.2	Übertragungsfunktion $G_0(s)$ mit verzögertem I-Verhalten	122
5.2.3	Übertragungsfunktion $G_0(s)$ mit verzögertem I_2 -Verhalten	122
5.3	Der PID-Regler und die aus ihm ableitbaren Reglertypen	124
5.3.1	Das Übertragungsverhalten	124
5.3.2	Vor- und Nachteile der verschiedenen Reglertypen	127
5.3.3	Technische Realisierung von linearen kontinuierlichen Reglern	130
5.3.3.1	Das Prinzip der Rückkopplung	130
5.3.3.2	Elektrische Regler	132
5.3.3.3	Pneumatische Regler	135
6	Stabilität linearer kontinuierlicher Regelsysteme	139
6.1	Definition der Stabilität und Stabilitätsbedingungen	139

6.2	Algebraische Stabilitätskriterien	141
6.2.1	Beiwertebedingungen	141
6.2.2	Das Hurwitz-Kriterium	144
6.2.3	Das Routh-Kriterium	147
6.3	Das Kriterium von Cremer-Leonhard-Michailow	149
6.4	Das Nyquist-Kriterium	152
6.4.1	Das Nyquist-Kriterium in der Ortskurven-Darstellung	153
6.4.1.1	Anwendungsbeispiele zum Nyquist-Kriterium	157
6.4.1.2	Anwendung auf Systeme mit Totzeit	157
6.4.1.3	Vereinfachte Formen des Nyquist-Kriteriums	162
6.4.2	Das Nyquist-Kriterium in der Frequenzkennlinien-Darstellung	163
7	Das Wurzelortskurven-Verfahren	169
7.1	Der Grundgedanke des Verfahrens	169
7.2	Allgemeine Regeln zur Konstruktion von Wurzelortskurven	172
7.3	Anwendung der Regeln zur Konstruktion der Wurzelortskurven	181
8	Klassische Verfahren zum Entwurf linearer kontinuierlicher Regelsysteme	185
8.1	Problemstellung	185
8.2	Entwurf im Zeitbereich	188
8.2.1	Gütemaße im Zeitbereich	188
8.2.1.1	Der dynamische Übergangsfehler	188
8.2.1.2	Integralkriterien	189
8.2.1.3	Berechnung der quadratischen Regelfläche	190
8.2.2	Ermittlung optimaler Einstellwerte eines Reglers nach dem Kriterium der minimalen quadratischen Regelfläche	193
8.2.2.1	Beispiel einer Optimierungsaufgabe nach dem quadratischen Gütekriterium	194
8.2.2.2	Parameteroptimierung von Standardreglertypen für PT_n -Regelstrecken	198
8.2.3	Empirisches Vorgehen	206
8.2.3.1	Empirische Einstellregeln nach Ziegler und Nichols	206
8.2.3.2	Empirischer Entwurf durch Simulation	208

8.3	Entwurf im Frequenzbereich	210
8.3.1	Kenndaten im Frequenzbereich	210
8.3.1.1	Kenndaten des geschlossenen Regelkreises im Frequenzbereich und deren Zusammenhang mit den Gütemaßen im Zeitbereich	210
8.3.1.2	Kenndaten des offenen Regelkreises und ihr Zusammenhang mit den Gütemaßen des geschlossenen Regelkreises im Zeitbereich	216
8.3.2	Reglersynthese nach dem Frequenzkennlinien-Verfahren	220
8.3.2.1	Der Grundgedanke	220
8.3.2.2	Phasenkorrekturglieder	222
8.3.2.3	Anwendung des Frequenzkennlinien-Verfahrens	228
8.3.3	Das Nichols-Diagramm	232
8.3.3.1	Das Hall-Diagramm	232
8.3.3.2	Das Amplituden-Phasendiagramm (Nichols-Diagramm)	233
8.3.3.3	Anwendung des Nichols-Diagramms	235
8.3.4	Reglerentwurf mit dem Wurzelortskurvenverfahren	239
8.3.4.1	Der Grundgedanke	239
8.3.4.2	Beispiele für den Reglerentwurf mit Hilfe des Wurzelortskurvenverfahrens	239
8.4	Analytische Entwurfsverfahren	244
8.4.1	Vorgabe des Verhaltens des geschlossenen Regelkreises	245
8.4.2	Das Verfahren nach Truxal-Guillemain	246
8.4.3	Ein algebraisches Entwurfsverfahren	256
8.4.3.1	Der Grundgedanke	256
8.4.3.2	Berücksichtigung der Nullstellen des geschlossenen Regelkreises	257
8.4.3.3	Lösung der Synthesegleichungen	260
8.4.3.4	Anwendung des Verfahrens	261
8.5	Reglerentwurf für Führungs- und Störungsverhalten	266
8.5.1	Struktur des Regelkreises	266
8.5.2	Der Reglerentwurf	267
8.5.2.1	Reglerentwurf für Störungen am Eingang der Regelstrecke	268
8.5.2.2	Reglerentwurf für Störungen am Ausgang der Regelstrecke	270

8.5.3	Entwurf des Vorfilters	273
8.5.3.1	Entwurf des Vorfilters für Störungen am Eingang der Regelstrecke	273
8.5.3.2	Entwurf des Vorfilters für Störungen am Ausgang der Regelstrecke	275
8.5.4	Anwendung des Verfahrens	276
8.5.4.1	Störungen am Eingang der Regelstrecke	277
8.5.4.2	Störungen am Ausgang der Regelstrecke	278
8.6	Verbesserung des Regelverhaltens durch Entwurf vermaschter Regelsysteme	281
8.6.1	Problemstellung	281
8.6.2	Störgrößenaufschaltung	281
8.6.2.1	Störgrößenaufschaltung auf den Regler	282
8.6.2.2	Störgrößenaufschaltung auf die Stellgröße	283
8.6.3	Regelsysteme mit Hilfsregelgröße	285
8.6.4	Kaskadenregelung	286
8.6.5	Regelsysteme mit Hilfsstellgröße	289
9	Identifikation von Regelkreisgliedern mittels deterministischer Signale	291
9.1	Theoretische und experimentelle Identifikation	291
9.2	Formulierung der Aufgabe der experimentellen Identifikation	292
9.3	Systemidentifikation im Zeitbereich	296
9.3.1	Bestimmung der Übergangsfunktion aus Messwerten	296
9.3.1.1	Rechteckimpuls als Eingangssignal	296
9.3.1.2	Rampenfunktion als Eingangssignal	296
9.3.1.3	Beliebiges deterministisches Eingangssignal	297
9.3.2	Verfahren zur Identifikation anhand der Übergangsfunktion oder Gewichtsfunktion	299
9.3.2.1	Wendetangenten- und Zeitprozentkennwerte-Verfahren	299
9.3.2.2	Weitere Verfahren	310
9.4	Systemidentifikation im Frequenzbereich	311
9.4.1	Identifikation mit dem Frequenzkennlinien-Verfahren	312
9.4.2	Identifikation durch Approximation eines vorgegebenen Frequenzganges	313

9.5	Numerische Transformationsmethoden zwischen Zeit- und Frequenzbereich	317
9.5.1	Grundlegende theoretische Zusammenhänge	317
9.5.2	Berechnung des Frequenzganges aus der Sprungantwort	321
9.5.3	Erweiterung des Verfahrens zur Berechnung des Frequenzganges für nichtsprungförmige Testsignale	323
9.5.4	Berechnung der Übergangsfunktion aus dem Frequenzgang	327
10	Grundlagen der Fuzzy-Regelung	329
10.1	Einführung	329
10.2	Einige wichtige Grundlagen der Fuzzy-Logik	331
10.2.1	Fuzzy-Menge und Zugehörigkeitsfunktion	331
10.2.2	Operatoren für unscharfe Mengen	335
10.2.3	Linguistische Variablen und Werte	336
10.3	Regelbasierte Fuzzy-Systeme	336
10.3.1	Regelbasis	337
10.3.2	Fuzzifizierung	338
10.3.3	Fuzzy-Inferenzmaschine	339
	10.3.3.1 Prämissenauswertung	339
	10.3.3.2 Komposition	340
	10.3.3.3 Regelaggregation	340
10.3.4	Defuzzifizierung	342
	10.3.4.1 Schwerpunktmethode	342
	10.3.4.2 Erweiterte Schwerpunktmethode	344
	10.3.4.3 Singleton-Schwerpunktmethode	344
	10.3.4.4 Maximummethode	345
10.4	Fuzzy-Systeme zur Regelung („fuzzy control“)	345
10.4.1	Grundstruktur eines Fuzzy-Reglers	345
	10.4.1.1 Signalaufbereitung im Eingang	346
	10.4.1.2 Fuzzy-Block	346
	10.4.1.3 Signalaufbereitung im Ausgang	347
10.4.2	Übertragungsverhalten von Fuzzy-Reglern	347
	10.4.2.1 Kennliniendarstellung	347

10.4.2.2 Kennfelddarstellung	354
10.4.3 Beispiel einer Fuzzy-Regelung	355
10.4.3.1 Beschreibung der Regelstrecke	355
10.4.3.2 Fuzzy-Reglerentwurf	356
10.4.4 Fuzzy-Regler nach Takagi und Sugeno	358
Literatur	361
Sachverzeichnis	369