

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der Anwendungsbeispiele	XVII
Inhaltsübersicht des zweiten Bandes	XXIII
Hinweise zum Gebrauch des Buches	XXV

Teil 1: Einführung

1 Zielstellung und theoretische Grundlagen der Regelungstechnik	1
1.1 Aufgaben der Regelungstechnik	1
1.2 Prinzipielle Funktionsweise von Regelungen	5
1.3 Lösungsweg für Regelungsaufgaben	14
1.4 Übersicht über die theoretischen Grundlagen der Regelungstechnik .	17
2 Beispiele für technische und nichttechnische Regelungsaufgaben	19
2.1 Gebäudeautomatisierung	19
2.2 Prozessregelung	21
2.3 Regelungsaufgaben in Energiesystemen	24
2.4 Robotersteuerungen	27
2.5 Regelung von Fahrzeugen	29
2.6 Mechatronik	30
2.7 Flugregelung	30
2.8 Der Mensch als Regler	31
2.9 Biologische Regelkreise	33
2.10 Gemeinsamkeiten von Regelungen in unterschiedlichen Anwendungsgebieten	34
Literaturhinweise	37

Teil 2: Modellbildung und Systemanalyse

3	Strukturelle Beschreibung dynamischer Systeme	39
3.1	Ziele und wichtige Schritte der Modellbildung	39
3.2	Blockschaltbild	41
3.3	Signalflussgraf	51
	Literaturhinweise	53
4	Beschreibung linearer Systeme im Zeitbereich	55
4.1	Modellbildungsaufgabe	55
4.2	Beschreibung linearer Systeme durch Differenzialgleichungen	57
4.2.1	Lineare Differenzialgleichung n -ter Ordnung	57
4.2.2	Aufstellung der Differenzialgleichung	58
4.2.3	Linearität dynamischer Systeme	65
4.2.4	Kausalität	67
4.2.5	Zeitinvarianz	70
4.3	Zustandsraumdarstellung linearer Systeme	70
4.3.1	Einführung des Zustandsraummodells	70
4.3.2	Zustand und Zustandsraum	74
4.3.3	Zustandsraumdarstellung von Mehrgrößensystemen	78
4.4	Aufstellung des Zustandsraummodells	80
4.4.1	Ableitung des Zustandsraummodells aus der Differenzialgleichung	80
4.4.2	Aufstellung des Zustandsraummodells aus den physikalischen Grundbeziehungen	89
4.4.3	Zustandsraummodell gekoppelter Systeme	95
4.4.4	Gültigkeitsbereich der Modelle und Normierung	100
4.5	Erweiterungen	106
4.5.1	Linearisierung nichtlinearer Systeme	106
4.5.2	Totzeitsysteme	113
4.5.3	Zeitvariable Systeme	114
4.6	MATLAB-Funktionen für die Beschreibung dynamischer Systeme	115
	Literaturhinweise	116
5	Verhalten linearer Systeme	119
5.1	Vorhersage des Systemverhaltens	119
5.2	Lösung der Zustandsgleichung	120
5.2.1	Lösung einer linearen Differenzialgleichung erster Ordnung	120
5.2.2	Lösung eines Differenzialgleichungssystems erster Ordnung	125
5.2.3	Verhalten linearer Systeme	128
5.2.4	Eigenschaften und Berechnungsmethoden für die Übergangsmatrix	133
5.3	Normalformen des Zustandsraummodells	135
5.3.1	Transformation der Zustandsgleichung	135
5.3.2	Kanonische Normalform	137

5.3.3	Erweiterung der kanonischen Normalform für nichtdiagonalähnliche Systemmatrizen	145
5.3.4	Bewegungsgleichung in kanonischer Darstellung	148
5.3.5	Regelungsnormalform	153
5.3.6	Beobachtungsnormalform	157
5.3.7	E/A-Normalform	160
5.3.8	Invariante Systemeigenschaften	166
5.4	Kennfunktionen des dynamischen Übertragungsverhaltens	167
5.4.1	Übergangsfunktion	167
5.4.2	Gewichtsfunktion	169
5.4.3	Zusammenhang zwischen Gewichtsfunktion und Übergangsfunktion	172
5.5	E/A-Verhalten	174
5.5.1	Darstellung des E/A-Verhaltens mit Hilfe der Gewichtsfunktion	174
5.5.2	Übergangsverhalten und stationäres Verhalten	177
5.5.3	Bedeutung der Nullstellen für das Übertragungsverhalten	183
5.5.4	Nulldynamik	186
5.6	Eigenschaften wichtiger Übertragungsglieder im Zeitbereich	190
5.6.1	Proportionalglieder	191
5.6.2	Integrierglieder	196
5.6.3	Differenzierglieder	198
5.6.4	Totzeitglieder	201
5.7	Modellvereinfachung und Kennwertermittlung	204
5.7.1	Modellvereinfachung	204
5.7.2	Approximation dynamischer Systeme durch PT ₁ -Glieder	208
5.7.3	Kennwertermittlung für PT ₂ -Glieder	212
5.7.4	Kennwertermittlung für PT ₁ T _t -Glieder	214
5.8	MATLAB-Funktionen für die Analyse des Zeitverhaltens	215
	Literaturhinweise	222
6	Beschreibung und Analyse linearer Systeme im Frequenzbereich	223
6.1	Zielstellung	223
6.2	Fouriertransformation	225
6.2.1	Zerlegung periodischer Signale	225
6.2.2	Zerlegung nichtperiodischer Signale	230
6.3	Frequenzgang	234
6.3.1	Lineare Systeme mit sinusförmigen Eingangssignalen	234
6.3.2	Berechnung des Frequenzganges	239
6.3.3	Eigenschaften und grafische Darstellung	240
6.4	LaplaceTransformation	244
6.4.1	Definition	244
6.4.2	Wichtige Eigenschaften	250
6.5	Übertragungsfunktion	253
6.5.1	Definition	253

6.5.2	Berechnung	257
6.5.3	Eigenschaften und grafische Darstellung	262
6.5.4	Pole und Nullstellen	264
6.5.5	Berechnung des Systemverhaltens	272
6.5.6	Übertragungsfunktion gekoppelter Systeme	279
6.6	Beziehungen zwischen den Modellen	284
6.7	Eigenschaften wichtiger Übertragungsglieder im Frequenzbereich ..	286
6.7.1	Proportionalglieder	286
6.7.2	Integrierglieder	302
6.7.3	Differenzierglieder	304
6.7.4	Übertragungsglieder mit Nullstellen	304
6.7.5	Übertragungsglieder mit gebrochen rationaler Übertragungsfunktion	306
6.7.6	Allpassglieder und nichtminimalphasige Systeme	314
6.7.7	Totzeitglieder	326
6.8	MATLAB-Funktionen für die Systemanalyse im Frequenzbereich ..	330
	Literaturhinweise	337
7	Der Regelkreis	339
7.1	Reglerentwurfsaufgabe	339
7.2	Modell des Standardregelkreises	345
7.2.1	Beschreibung im Frequenzbereich	345
7.2.2	Beschreibung im Zeitbereich	349
7.3	Stationäres Verhalten von Regelkreisen	351
7.3.1	Stör- und Führungssignale	351
7.3.2	Stationäres Verhalten bei impulsförmiger Erregung	354
7.3.3	Stationäres Verhalten bei sprungförmiger Erregung	355
7.3.4	Stationäres Verhalten bei rampenförmiger Erregung	357
7.3.5	Sollwertfolge bei Verwendung eines Vorfilters	359
7.3.6	Inneres-Modell-Prinzip	360
7.4	Übergangsverhalten des Regelkreises	365
7.4.1	Perfekte Regelung	365
7.4.2	Beschränkungen für die erreichbare Regelgüte bei einer Festwertregelung	365
7.4.3	Nichtminimalphasenverhalten von Regelkreisen	369
7.4.4	Gleichgewichtstheorem	369
7.4.5	Empfindlichkeit und Robustheit von Regelkreisen	377
7.4.6	Konsequenzen für den Reglerentwurf	381
7.5	Entwurf von Vorsteuerungen	382
7.5.1	Aufgaben der Folgeregelung	382
7.5.2	Inversionsbasierter Vorsteuerungsentwurf	384
7.5.3	Trajektorienplanung für Arbeitspunktwechsel	389
7.5.4	Vorsteuerung im stationären Zustand	392
7.6	Reglertypen und Richtlinien für die Wahl der Reglerstruktur	394
	Literaturhinweise	400

8	Stabilität rückgekoppelter Systeme	401
8.1	Zustandsstabilität	401
8.1.1	Definition der Zustandsstabilität	402
8.1.2	Kriterien für die Zustandsstabilität	404
8.2	Eingangs-Ausgangs-Stabilität	408
8.2.1	Definition der E/A-Stabilität	408
8.2.2	Kriterien für die E/A-Stabilität	408
8.2.3	Beziehungen zwischen Zustandsstabilität und E/A-Stabilität	411
8.3	Stabilitätsprüfung anhand des charakteristischen Polynoms	411
8.3.1	Vorgehensweise	411
8.3.2	Hurwitzkriterium	412
8.3.3	Routhkriterium	415
8.4	Stabilitätsprüfung anhand der Pole des geschlossenen Kreises	418
8.4.1	E/A-Stabilität von Regelkreisen	418
8.4.2	Innere Stabilität von Regelkreisen	421
8.5	Stabilitätsprüfung anhand des Frequenzganges der offenen Kette	424
8.5.1	Herleitung der Stabilitätsbedingung	424
8.5.2	Nyquistkriterium	428
8.5.3	Beispiele	430
8.5.4	Erweiterungen	435
8.5.5	Phasenrandkriterium	441
8.6	Robuste Stabilität	445
8.6.1	Zielsetzung	445
8.6.2	Beschreibung der Modellunsicherheiten	445
8.6.3	Nachweis der robusten Stabilität	448
8.7	Stabilitätsanalyse mit MATLAB	454
	Literaturhinweise	456

Teil 3: Entwurf einschleifiger Regelkreise

9	Entwurf einschleifiger Regelkreise	457
9.1	Allgemeines Vorgehen beim Reglerentwurf	457
9.2	Übersicht über die Entwurfsverfahren	459
9.3	Rechnergestützter Entwurf	461
9.4	Einstellregeln für PID-Regler	462
	Literaturhinweise	466
10	Reglerentwurf anhand des PN-Bildes des geschlossenen Kreises	467
10.1	Beziehungen zwischen dem PN-Bild und den Güteforderungen	467
10.1.1	Regelkreise mit dominierendem Polpaar	467
10.1.2	Regelkreise mit einem dominierenden Pol	475
10.2	Wurzelortskurve	475
10.2.1	Definition	475

10.2.2	Eigenschaften und Konstruktionsvorschriften	477
10.3	Reglerentwurf unter Verwendung der Wurzelortskurve	487
10.3.1	Entwurfsverfahren	487
10.3.2	Regelung mit hoher Kreisverstärkung	493
10.3.3	Zusammenfassende Bewertung des Entwurfsverfahrens	494
10.4	MATLAB-Funktionen zum Reglerentwurf anhand des PN-Bildes	498
	Literaturhinweise	502
11	Reglerentwurf anhand der Frequenzkennlinie der offenen Kette	503
11.1	Frequenzkennlinie und Regelgüte	503
11.1.1	Näherung des Regelkreises durch ein PT_2 -Glied	503
11.1.2	Statisches Verhalten des Regelkreises	504
11.1.3	Führungsverhalten des Regelkreises	505
11.1.4	Störverhalten des Regelkreises	511
11.2	Reglerentwurf unter Beachtung des Führungsverhaltens	516
11.2.1	Entwurfsverfahren	516
11.2.2	Entwurfsdurchführung	518
11.3	Reglerentwurf unter Beachtung des Störverhaltens	528
11.4	MATLAB-Programm zum Frequenzkennlinienentwurf	531
	Literaturhinweise	531
12	Weitere Entwurfsverfahren	533
12.1	Kompensationsregler	533
12.2	Modellbasierte Regelung (<i>Internal Model Control</i>)	539
12.2.1	Grundidee des Verfahrens	539
12.2.2	Entwurf von IMC-Reglern durch H_2 -Optimierung	542
12.2.3	Entwurf robuster IMC-Regler	546
12.2.4	Beziehung zwischen klassischen Reglern und IMC-Reglern	549
12.3	Smithprädiktor	551
	Literaturhinweise	558
13	Erweiterungen der Regelungsstruktur	561
13.1	Vermischte Regelungen	561
13.1.1	Störgrößenaufschaltung	562
13.1.2	Regelkreis mit Hilfsregelgröße	565
13.1.3	Kaskadenregelung	567
13.1.4	Regelkreis mit Hilfsstellgröße	569
13.2	Mehrgrößenregelungen	570
13.3	Robuste, adaptive, nichtlineare und fehlertolerante Regelungen	571
	Literaturverzeichnis	575

Anhänge

Anhang 1: Lösung der Übungsaufgaben	579
Anhang 2: Kurze Einführung in MATLAB	673
Anhang 3: Aufgaben zur Prüfungsvorbereitung	683
Anhang 4: Projektaufgaben	687
Anhang 5: Verzeichnis der wichtigsten Formelzeichen	695
Anhang 6: Korrespondenztabelle der Laplacetransformation	697
Anhang 7: Fachwörter deutsch – englisch	699
Sachwortverzeichnis	703