

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
Literaturhinweise	18
2 Beispiele für technische und nichttechnische Regelungsaufgaben	21
2.1 Gebäudeautomatisierung	21
2.2 Prozessregelung	24
2.3 Regelungsaufgaben in Energiesystemen	26
2.4 Robotersteuerungen	29
2.5 Regelung von Fahrzeugen	31
2.6 Mechatronik	32
2.7 Flugregelung	33
2.8 Der Mensch als Regler	34
2.9 Biologische Regelkreise	35
2.10 Gemeinsamkeiten von Regelungen in unterschiedlichen Anwendungsgebieten	37
Literaturhinweise	40

Teil 2: Modellbildung und Systemanalyse

3	Strukturelle Beschreibung dynamischer Systeme	41
3.1	Ziele und wichtige Schritte der Modellbildung	41
3.2	Blockschaltbild	43
3.3	Signalflussgraph	55
	Literaturhinweise	57
4	Beschreibung linearer Systeme im Zeitbereich	59
4.1	Modellbildungsaufgabe	59
4.2	Beschreibung linearer Systeme durch Differentialgleichungen	61
4.2.1	Lineare Differentialgleichung n -ter Ordnung	61
4.2.2	Aufstellung der Differentialgleichung	62
4.2.3	Linearität dynamischer Systeme	69
4.2.4	Kausalität	71
4.2.5	Zeitinvarianz	74
4.3	Zustandsraumdarstellung linearer Systeme	74
4.3.1	Einführung des Zustandsraummodells	74
4.3.2	Zustand und Zustandsraum	78
4.3.3	Zustandsraumdarstellung von Mehrgrößensystemen	82
4.4	Aufstellung des Zustandsraummodells	85
4.4.1	Ableitung des Zustandsraummodells aus der Differentialgleichung	85
4.4.2	Aufstellung des Zustandsraummodells aus den physikalischen Grundbeziehungen	93
4.4.3	Zustandsraummodell gekoppelter Systeme	100
4.4.4	Gültigkeitsbereich der Modelle und Normierung	104
4.5	Erweiterungen	110
4.5.1	Linearisierung nichtlinearer Systeme	110
4.5.2	Totzeitsysteme	118
4.5.3	Zeitvariable Systeme	118
4.6	MATLAB-Funktionen für die Beschreibung dynamischer Systeme	119
	Literaturhinweise	120
5	Verhalten linearer Systeme	123
5.1	Vorhersage des Systemverhaltens	123
5.2	Lösung der Zustandsgleichung	124
5.2.1	Lösung einer linearen Differentialgleichung erster Ordnung	124
5.2.2	Lösung eines Differentialgleichungssystems erster Ordnung	128
5.2.3	Verhalten linearer Systeme	132
5.2.4	Eigenschaften und Berechnungsmethoden für die Übergangsmatrix	137
5.3	Normalformen des Zustandsraummodells	140
5.3.1	Transformation der Zustandsgleichung	140
5.3.2	Kanonische Normalform	142

5.3.3	Erweiterung der kanonischen Normalform für nichtdiagonalähnliche Systemmatrizen	149
5.3.4	Bewegungsgleichung in kanonischer Darstellung	153
5.3.5	Regelungsnormform	158
5.3.6	Beobachtungsnormform	163
5.3.7	E/A-Normalform	165
5.3.8	Invariante Systemeigenschaften	173
5.4	Kennfunktionen des dynamischen Übertragungsverhaltens	174
5.4.1	Übergangsfunktion	174
5.4.2	Gewichtsfunktion	176
5.4.3	Zusammenhang zwischen Gewichtsfunktion und Übergangsfunktion	179
5.5	E/A-Verhalten	181
5.5.1	Darstellung des E/A-Verhaltens mit Hilfe der Gewichtsfunktion	181
5.5.2	Übergangsverhalten und stationäres Verhalten	184
5.5.3	Bedeutung der Nullstellen für das Übertragungsverhalten	190
5.5.4	Nulldynamik	193
5.6	Eigenschaften wichtiger Übertragungsglieder im Zeitbereich	198
5.6.1	Proportionalglieder	198
5.6.2	Integrierglieder	204
5.6.3	Differenzierglieder	206
5.6.4	Totzeitglieder	209
5.7	Modellvereinfachung und Kennwertermittlung	211
5.7.1	Modellvereinfachung	212
5.7.2	Approximation dynamischer Systeme durch PT_1 -Glieder	216
5.7.3	Kennwertermittlung für PT_2 -Glieder	221
5.7.4	Kennwertermittlung für $PT_1 T_t$ -Glieder	223
5.8	MATLAB-Funktionen für die Analyse des Zeitverhaltens	224
	Literaturhinweise	231
6	Beschreibung und Analyse linearer Systeme im Frequenzbereich	233
6.1	Zielstellung	233
6.2	Fouriertransformation	235
6.2.1	Zerlegung periodischer Signale	235
6.2.2	Zerlegung nichtperiodischer Signale	240
6.3	Frequenzgang	245
6.3.1	Lineare Systeme mit sinusförmigen Eingangssignalen	245
6.3.2	Berechnung des Frequenzgangs	249
6.3.3	Eigenschaften und grafische Darstellung	251
6.4	Laplacetransformation	254
6.4.1	Definition	254
6.4.2	Wichtige Eigenschaften	260

6.5	Übertragungsfunktion	263
6.5.1	Definition	263
6.5.2	Berechnung	267
6.5.3	Eigenschaften und grafische Darstellung	272
6.5.4	Pole und Nullstellen	275
6.5.5	Berechnung des Systemverhaltens	283
6.5.6	Übertragungsfunktion gekoppelter Systeme	290
6.6	Beziehungen zwischen den Modellen	295
6.7	Eigenschaften wichtiger Übertragungsglieder im Frequenzbereich ..	297
6.7.1	Proportionalglieder	297
6.7.2	Integrierglieder	314
6.7.3	Differenzierglieder	315
6.7.4	Übertragungsglieder mit Nullstellen	316
6.7.5	Weitere Übertragungsglieder	318
6.7.6	Allpassglieder und nichtminimalphasige Systeme	325
6.7.7	Totzeitglieder	339
6.8	MATLAB-Funktionen für die Systemanalyse im Frequenzbereich ..	343
	Literaturhinweise	351
7	Der Regelkreis	353
7.1	Reglerentwurfsaufgabe	353
7.2	Modell des Standardregelkreises	359
7.2.1	Beschreibung im Frequenzbereich	359
7.2.2	Beschreibung im Zeitbereich	364
7.3	Stationäres Verhalten von Regelkreisen	365
7.3.1	Stör- und Führungssignale	365
7.3.2	Stationäres Verhalten bei impulsförmiger Erregung	368
7.3.3	Stationäres Verhalten bei sprungförmiger Erregung	369
7.3.4	Stationäres Verhalten bei weiteren Signalklassen	371
7.3.5	Sollwertfolge bei Verwendung eines Vorfilters	375
7.4	Übergangsverhalten des Regelkreises	376
7.4.1	Perfekte Regelung	376
7.4.2	Beschränkungen für die erreichbare Regelgüte bei einer Festwertregelung	377
7.4.3	Nichtminimalphasenverhalten von Regelkreisen	380
7.4.4	Gleichgewichtstheorem	381
7.4.5	Empfindlichkeit und Robustheit von Regelkreisen	388
7.4.6	Konsequenzen für den Reglerentwurf	392
7.5	Entwurf von Vorsteuerungen	394
7.5.1	Aufgaben der Folgeregung	394
7.5.2	Inversionsbasierter Vorsteuerungsentwurf	395
7.5.3	Trajektorienplanung für Arbeitspunktwechsel	401
7.5.4	Vorsteuerung in den stationären Zustand	404
7.6	Reglertypen und Richtlinien für die Wahl der Reglerstruktur	407
	Literaturhinweise	414

8	Stabilität rückgekoppelter Systeme	415
8.1	Zustandsstabilität	415
8.1.1	Stabilitätsbegriff	415
8.1.2	Definition der Zustandsstabilität	416
8.1.3	Kriterien für die Zustandsstabilität	418
8.2	Eingangs-Ausgangs-Stabilität	422
8.2.1	Definition der E/A-Stabilität	422
8.2.2	Kriterien für die E/A-Stabilität	423
8.2.3	Beziehungen zwischen Zustandsstabilität und E/A-Stabilität	425
8.3	Stabilitätsprüfung anhand des charakteristischen Polynoms	426
8.3.1	Vorgehensweise	426
8.3.2	Hurwitzkriterium	427
8.4	Stabilitätsprüfung anhand der Pole des geschlossenen Kreises	430
8.4.1	E/A-Stabilität von Regelkreisen	430
8.4.2	Innere Stabilität von Regelkreisen	433
8.5	Stabilitätsprüfung anhand des Frequenzganges der offenen Kette	436
8.5.1	Herleitung der Stabilitätsbedingung	436
8.5.2	Nyquistkriterium	440
8.5.3	Beispiele	442
8.5.4	Erweiterungen	447
8.5.5	Phasenrandkriterium	453
8.6	Robuste Stabilität	457
8.6.1	Zielsetzung	457
8.6.2	Beschreibung der Modellunbestimmtheiten	458
8.6.3	Nachweis der robusten Stabilität	461
8.7	Stabilitätsanalyse mit MATLAB	466
	Literaturhinweise	469

Teil 3: Entwurf einschleifiger Regelkreise

9	Entwurf einschleifiger Regelkreise	471
9.1	Allgemeines Vorgehen beim Reglerentwurf	471
9.2	Übersicht über die Entwurfsverfahren	473
9.3	Rechnergestützter Entwurf	475
9.4	Einstellregeln für PID-Regler	476
	Literaturhinweise	480
10	Reglerentwurf anhand des PN-Bildes des geschlossenen Kreises	483
10.1	Beziehungen zwischen dem PN-Bild und den Güteforderungen	483
10.1.1	Regelkreise mit dominierendem Polpaar	483
10.1.2	Regelkreise mit einem dominierenden Pol	491

10.2	Wurzelortskurve	492
10.2.1	Definition	492
10.2.2	Eigenschaften und Konstruktionsvorschriften	494
10.3	Reglerentwurf unter Verwendung der Wurzelortskurve	504
10.3.1	Entwurfsverfahren	504
10.3.2	Regelung mit hoher Kreisverstärkung	510
10.3.3	Zusammenfassende Bewertung des Entwurfsverfahrens ...	511
10.4	MATLAB-Funktionen zum Reglerentwurf anhand des PN-Bildes ..	516
	Literaturhinweise	520
11	Reglerentwurf anhand der Frequenzkennlinie der offenen Kette ...	521
11.1	Frequenzkennlinie und Regelgüte	521
11.1.1	Näherung des Regelkreises durch ein PT_2 -Glied	521
11.1.2	Statisches Verhalten des Regelkreises	522
11.1.3	Führungsverhalten des Regelkreises	523
11.1.4	Störverhalten des Regelkreises	529
11.2	Reglerentwurf unter Beachtung des Führungsverhaltens	535
11.2.1	Entwurfsverfahren	535
11.2.2	Entwurfsdurchführung	536
11.3	Reglerentwurf unter Beachtung des Störverhaltens	547
11.4	MATLAB-Programm zum Frequenzkennlinienentwurf	550
	Literaturhinweise	552
12	Weitere Entwurfsverfahren	553
12.1	Kompensationsregler	553
12.2	Modellbasierte Regelung (<i>Internal Model Control</i>)	559
12.2.1	Grundidee des Verfahrens	559
12.2.2	Entwurf von IMC-Reglern durch H_2 -Optimierung	562
12.2.3	Entwurf robuster IMC-Regler	566
12.2.4	Beziehung zwischen klassischen Reglern und IMC-Reglern ..	569
12.3	Smithprädiktor	571
	Literaturhinweise	579
13	Erweiterungen der Regelungsstruktur	581
13.1	Vermaschte Regelungen	581
13.1.1	Störgrößenaufschaltung	582
13.1.2	Regelkreis mit Hilfsregelgröße	585
13.1.3	Kaskadenregelung	587
13.1.4	Regelkreis mit Hilfsstellgröße	589
13.2	Mehrgrößenregelungen	590
13.3	Robuste, adaptive, nichtlineare und fehlertolerante Regelungen ...	592
	Literaturverzeichnis	595

Anhänge

Anhang 1: Lösung der Übungsaufgaben	601
Anhang 2: Kurze Einführung in MATLAB	703
Anhang 3: Aufgaben zur Prüfungsvorbereitung	713
Anhang 4: Projektaufgaben	717
Anhang 5: Verzeichnis der wichtigsten Formelzeichen	727
Anhang 6: Korrespondenztabelle der Laplacetransformation	729
Anhang 7: Fachwörter deutsch – englisch	731
Sachwortverzeichnis	735