

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	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	32
2.9 Biologische Regelkreise	33
2.10 Gemeinsamkeiten von Regelungen in unterschiedlichen Anwendungsgebieten	35
Literaturhinweise	38

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	Signalflussgraph	52
	Literaturhinweise	54
4	Beschreibung linearer Systeme im Zeitbereich	55
4.1	Modellbildungsaufgabe	55
4.2	Beschreibung linearer Systeme durch Differentialgleichungen	57
4.2.1	Lineare Differentialgleichung n -ter Ordnung	57
4.2.2	Aufstellung der Differentialgleichung	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 Differentialgleichung	81
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	105
4.5.1	Linearisierung nichtlinearer Systeme	105
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 Differentialgleichung erster Ordnung	120
5.2.2	Lösung eines Differentialgleichungssystems 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	Regelungsnormform	154
5.3.6	Beobachtungsnormform	158
5.3.7	E/A-Normalform	161
5.3.8	Invariante Systemeigenschaften	168
5.4	Kennfunktionen des dynamischen Übertragungsverhaltens	169
5.4.1	Übergangsfunktion	169
5.4.2	Gewichtsfunktion	171
5.4.3	Zusammenhang zwischen Gewichtsfunktion und Übergangsfunktion	174
5.5	E/A-Verhalten	176
5.5.1	Darstellung des E/A-Verhaltens mit Hilfe der Gewichtsfunktion	176
5.5.2	Übergangsverhalten und stationäres Verhalten	179
5.5.3	Bedeutung der Nullstellen für das Übertragungsverhalten ...	185
5.5.4	Nulldynamik	188
5.6	Eigenschaften wichtiger Übertragungsglieder im Zeitbereich	193
5.6.1	Proportionalglieder	193
5.6.2	Integrierglieder	199
5.6.3	Differenzierglieder	200
5.6.4	Totzeitglieder	203
5.7	Modellvereinfachung und Kennwertermittlung	205
5.7.1	Modellvereinfachung	206
5.7.2	Approximation dynamischer Systeme durch PT_1 -Glieder ...	210
5.7.3	Kennwertermittlung für PT_2 -Glieder	214
5.7.4	Kennwertermittlung für PT_1T_1 -Glieder	216
5.8	MATLAB-Funktionen für die Analyse des Zeitverhaltens	217
	Literaturhinweise	223
6	Beschreibung und Analyse linearer Systeme im Frequenzbereich ...	225
6.1	Zielstellung	225
6.2	Fouriertransformation	227
6.2.1	Zerlegung periodischer Signale	227
6.2.2	Zerlegung nichtperiodischer Signale	233
6.3	Frequenzgang	237
6.3.1	Lineare Systeme mit sinusförmigen Eingangssignalen	237
6.3.2	Berechnung des Frequenzgangs	242
6.3.3	Eigenschaften und grafische Darstellung	243
6.4	Laplace-Transformation	246
6.4.1	Definition	246
6.4.2	Wichtige Eigenschaften	252
6.5	Übertragungsfunktion	255
6.5.1	Definition	255

6.5.2	Berechnung	260
6.5.3	Eigenschaften und grafische Darstellung	265
6.5.4	Pole und Nullstellen	267
6.5.5	Berechnung des Systemverhaltens	275
6.5.6	Übertragungsfunktion gekoppelter Systeme	282
6.6	Beziehungen zwischen den Modellen	286
6.7	Eigenschaften wichtiger Übertragungsglieder im Frequenzbereich ..	289
6.7.1	Proportionalglieder	289
6.7.2	Integrierglieder	305
6.7.3	Differenzierglieder	307
6.7.4	Übertragungsglieder mit Nullstellen	307
6.7.5	Übertragungsglieder mit gebrochen rationaler Übertragungsfunktion	309
6.7.6	Allpassglieder und nichtminimalphasige Systeme	317
6.7.7	Totzeitglieder	331
6.8	MATLAB-Funktionen für die Systemanalyse im Frequenzbereich ..	335
	Literaturhinweise	342
7	Der Regelkreis	345
7.1	Reglerentwurfsaufgabe	345
7.2	Modell des Standardregelkreises	351
7.2.1	Beschreibung im Frequenzbereich	351
7.2.2	Beschreibung im Zeitbereich	356
7.3	Stationäres Verhalten von Regelkreisen	357
7.3.1	Stör- und Führungssignale	357
7.3.2	Stationäres Verhalten bei impulsförmiger Erregung	360
7.3.3	Stationäres Verhalten bei sprungförmiger Erregung	361
7.3.4	Stationäres Verhalten bei weiteren Signalklassen	363
7.3.5	Sollwertfolge bei Verwendung eines Vorfilters	367
7.4	Übergangsverhalten des Regelkreises	368
7.4.1	Perfekte Regelung	368
7.4.2	Beschränkungen für die erreichbare Regelgüte bei einer Festwertregelung	369
7.4.3	Nichtminimalphasenverhalten von Regelkreisen	372
7.4.4	Gleichgewichtstheorem	373
7.4.5	Empfindlichkeit und Robustheit von Regelkreisen	380
7.4.6	Konsequenzen für den Reglerentwurf	384
7.5	Entwurf von Vorsteuerungen	386
7.5.1	Aufgaben der Folgeregelung	386
7.5.2	Inversionsbasierter Vorsteuerungsentwurf	387
7.5.3	Trajektorienplanung für Arbeitspunktwechsel	392
7.5.4	Vorsteuerung in den stationären Zustand	395
7.6	Reglertypen und Richtlinien für die Wahl der Reglerstruktur	398
	Literaturhinweise	405

8	Stabilität rückgekoppelter Systeme	407
8.1	Zustandsstabilität	407
8.1.1	Stabilitätsbegriff	407
8.1.2	Definition der Zustandsstabilität	408
8.1.3	Kriterien für die Zustandsstabilität	410
8.2	Eingangs-Ausgangs-Stabilität	414
8.2.1	Definition der E/A-Stabilität	414
8.2.2	Kriterien für die E/A-Stabilität	415
8.2.3	Beziehungen zwischen Zustandsstabilität und E/A-Stabilität	417
8.3	Stabilitätsprüfung anhand des charakteristischen Polynoms	418
8.3.1	Vorgehensweise	418
8.3.2	Hurwitzkriterium	419
8.4	Stabilitätsprüfung anhand der Pole des geschlossenen Kreises	422
8.4.1	E/A-Stabilität von Regelkreisen	422
8.4.2	Innere Stabilität von Regelkreisen	425
8.5	Stabilitätsprüfung anhand des Frequenzganges der offenen Kette	427
8.5.1	Herleitung der Stabilitätsbedingung	427
8.5.2	Nyquistkriterium	432
8.5.3	Beispiele	434
8.5.4	Erweiterungen	439
8.5.5	Phasenrandkriterium	445
8.6	Robuste Stabilität	449
8.6.1	Zielsetzung	449
8.6.2	Beschreibung der Modellunbestimmtheiten	449
8.6.3	Nachweis der robusten Stabilität	453
8.7	Stabilitätsanalyse mit MATLAB	458
	Literaturhinweise	461

Teil 3: Entwurf einschleifiger Regelkreise

9	Entwurf einschleifiger Regelkreise	463
9.1	Allgemeines Vorgehen beim Reglerentwurf	463
9.2	Übersicht über die Entwurfsverfahren	465
9.3	Rechnergestützter Entwurf	467
9.4	Einstellregeln für PID-Regler	468
	Literaturhinweise	472
10	Reglerentwurf anhand des PN-Bildes des geschlossenen Kreises	475
10.1	Beziehungen zwischen dem PN-Bild und den Güteforderungen	475
10.1.1	Regelkreise mit dominierendem Polpaar	475
10.1.2	Regelkreise mit einem dominierenden Pol	483
10.2	Wurzelortskurve	484
10.2.1	Definition	484

10.2.2	Eigenschaften und Konstruktionsvorschriften	485
10.3	Reglerentwurf unter Verwendung der Wurzelortskurve	496
10.3.1	Entwurfsverfahren	496
10.3.2	Regelung mit hoher Kreisverstärkung	502
10.3.3	Zusammenfassende Bewertung des Entwurfsverfahrens	503
10.4	MATLAB-Funktionen zum Reglerentwurf anhand des PN-Bildes ..	507
	Literaturhinweise	511
11	Reglerentwurf anhand der Frequenzkennlinie der offenen Kette	513
11.1	Frequenzkennlinie und Regelgüte	513
11.1.1	Näherung des Regelkreises durch ein PT_2 -Glied	513
11.1.2	Statisches Verhalten des Regelkreises	514
11.1.3	Führungsverhalten des Regelkreises	516
11.1.4	Störverhalten des Regelkreises	521
11.2	Reglerentwurf unter Beachtung des Führungsverhaltens	527
11.2.1	Entwurfsverfahren	527
11.2.2	Entwurfsdurchführung	528
11.3	Reglerentwurf unter Beachtung des Störverhaltens	538
11.4	MATLAB-Programm zum Frequenzkennlinienentwurf	541
	Literaturhinweise	543
12	Weitere Entwurfsverfahren	545
12.1	Kompensationsregler	545
12.2	Modellbasierte Regelung (<i>Internal Model Control</i>)	551
12.2.1	Grundidee des Verfahrens	551
12.2.2	Entwurf von IMC-Reglern durch H_2 -Optimierung	554
12.2.3	Entwurf robuster IMC-Regler	558
12.2.4	Beziehung zwischen klassischen Reglern und IMC-Reglern ..	561
12.3	Smithprädiktor	563
	Literaturhinweise	570
13	Erweiterungen der Regelungsstruktur	573
13.1	Vermaschte Regelungen	573
13.1.1	Störgrößenaufschaltung	574
13.1.2	Regelkreis mit Hilfsregelgröße	577
13.1.3	Kaskadenregelung	579
13.1.4	Regelkreis mit Hilfsstellgröße	581
13.2	Mehrgrößenregelungen	582
13.3	Robuste, adaptive, nichtlineare und fehlertolerante Regelungen	584
	Literaturverzeichnis	587

Anhänge

Anhang 1: Lösung der Übungsaufgaben	593
Anhang 2: Kurze Einführung in MATLAB	691
Anhang 3: Aufgaben zur Prüfungsvorbereitung	701
Anhang 4: Projektaufgaben	705
Anhang 5: Verzeichnis der wichtigsten Formelzeichen	713
Anhang 6: Korrespondenztabelle der Laplacetransformation	715
Anhang 7: Fachwörter deutsch – englisch	717
Sachwortverzeichnis	721