

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	19
2 Beispiele für technische und nichttechnische Regelungsaufgaben	21
2.1 Gebäudeautomatisierung	21
2.2 Prozessregelung	23
2.3 Regelungsaufgaben in Energiesystemen	26
2.4 Robotersteuerungen	29
2.5 Regelung von Fahrzeugen	31
2.6 Mechatronik	32
2.7 Flugregelung	32
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 Signalflussgraf	54
Literaturhinweise	56
4 Beschreibung linearer Systeme im Zeitbereich	57
4.1 Modellbildungsaufgabe	57
4.2 Beschreibung linearer Systeme durch Differenzialgleichungen	59
4.2.1 Lineare Differenzialgleichung n -ter Ordnung	59
4.2.2 Aufstellung der Differenzialgleichung	60
4.2.3 Linearität dynamischer Systeme	67
4.2.4 Kausalität	69
4.2.5 Zeitinvarianz	72
4.3 Zustandsraumdarstellung linearer Systeme	72
4.3.1 Einführung des Zustandsraummodells	72
4.3.2 Zustand und Zustandsraum	76
4.3.3 Zustandsraumdarstellung von Mehrgrößensystemen	80
4.4 Aufstellung des Zustandsraummodells	83
4.4.1 Ableitung des Zustandsraummodells aus der Differenzialgleichung	83
4.4.2 Aufstellung des Zustandsraummodells aus den physikalischen Grundbeziehungen	92
4.4.3 Zustandsraummodell gekoppelter Systeme	98
4.4.4 Gültigkeitsbereich der Modelle und Normierung	103
4.5 Erweiterungen	109
4.5.1 Linearisierung nichtlinearer Systeme	109
4.5.2 Totzeitsysteme	116
4.5.3 Zeitvariable Systeme	117
4.6 MATLAB-Funktionen für die Beschreibung dynamischer Systeme	118
Literaturhinweise	119
5 Verhalten linearer Systeme	121
5.1 Vorhersage des Systemverhaltens	121
5.2 Lösung der Zustandsgleichung	122
5.2.1 Lösung einer linearen Differenzialgleichung erster Ordnung	122
5.2.2 Lösung eines Differenzialgleichungssystems erster Ordnung	127
5.2.3 Verhalten linearer Systeme	130
5.2.4 Eigenschaften und Berechnungsmethoden für die Übergangsmatrix	135
5.3 Normalformen des Zustandsraummodells	137
5.3.1 Transformation der Zustandsgleichung	138
5.3.2 Kanonische Normalform	139

5.3.3	Erweiterung der kanonischen Normalform für nichtdiagonalähnliche Systemmatrizen	147
5.3.4	Bewegungsgleichung in kanonischer Darstellung	150
5.3.5	Regelungsnormalform	155
5.3.6	Beobachtungsnormalform	160
5.3.7	E/A-Normalform	162
5.3.8	Invariante Systemeigenschaften	169
5.4	Kennfunktionen des dynamischen Übertragungsverhaltens	169
5.4.1	Übergangsfunktion	170
5.4.2	Gewichtsfunktion	171
5.4.3	Zusammenhang zwischen Gewichtsfunktion und Übergangsfunktion	175
5.5	E/A-Verhalten	177
5.5.1	Darstellung des E/A-Verhaltens mit Hilfe der Gewichtsfunktion	177
5.5.2	Übergangsverhalten und stationäres Verhalten	180
5.5.3	Bedeutung der Nullstellen für das Übertragungsverhalten	186
5.5.4	Nulldynamik	189
5.6	Eigenschaften wichtiger Übertragungsglieder im Zeitbereich	193
5.6.1	Proportionalglieder	194
5.6.2	Integrierglieder	199
5.6.3	Differenzierglieder	201
5.6.4	Totzeitglieder	204
5.7	Modellvereinfachung und Kennwertermittlung	207
5.7.1	Modellvereinfachung	207
5.7.2	Approximation dynamischer Systeme durch PT ₁ -Glieder	211
5.7.3	Kennwertermittlung für PT ₂ -Glieder	215
5.7.4	Kennwertermittlung für PT ₁ T _t -Glieder	217
5.8	MATLAB-Funktionen für die Analyse des Zeitverhaltens	218
	Literaturhinweise	224
6	Beschreibung und Analyse linearer Systeme im Frequenzbereich	227
6.1	Zielstellung	227
6.2	Fouriertransformation	229
6.2.1	Zerlegung periodischer Signale	229
6.2.2	Zerlegung nichtperiodischer Signale	235
6.3	Frequenzgang	239
6.3.1	Lineare Systeme mit sinusförmigen Eingangssignalen	239
6.3.2	Berechnung des Frequenzganges	244
6.3.3	Eigenschaften und grafische Darstellung	245
6.4	LaplaceTransformation	248
6.4.1	Definition	248
6.4.2	Wichtige Eigenschaften	254
6.5	Übertragungsfunktion	257
6.5.1	Definition	257

6.5.2	Berechnung	262
6.5.3	Eigenschaften und grafische Darstellung	267
6.5.4	Pole und Nullstellen	269
6.5.5	Berechnung des Systemverhaltens	277
6.5.6	Übertragungsfunktion gekoppelter Systeme	284
6.6	Beziehungen zwischen den Modellen	289
6.7	Eigenschaften wichtiger Übertragungsglieder im Frequenzbereich ..	291
6.7.1	Proportionalglieder	291
6.7.2	Integrierglieder	307
6.7.3	Differenzierglieder	308
6.7.4	Übertragungsglieder mit Nullstellen	309
6.7.5	Übertragungsglieder mit gebrochen rationaler Übertragungsfunktion	312
6.7.6	Allpassglieder und nichtminimalphasige Systeme	319
6.7.7	Totzeitglieder	331
6.8	MATLAB-Funktionen für die Systemanalyse im Frequenzbereich ..	335
	Literaturhinweise	342
7	Der Regelkreis	343
7.1	Reglerentwurfsaufgabe	343
7.2	Modell des Standardregelkreises	349
7.2.1	Beschreibung im Frequenzbereich	349
7.2.2	Beschreibung im Zeitbereich	353
7.3	Stationäres Verhalten von Regelkreisen	355
7.3.1	Stör- und Führungssignale	355
7.3.2	Stationäres Verhalten bei impulsförmiger Erregung	358
7.3.3	Stationäres Verhalten bei sprungförmiger Erregung	359
7.3.4	Stationäres Verhalten bei weiteren Signalklassen	361
7.3.5	Sollwertfolge bei Verwendung eines Vorfilters	365
7.4	Übergangsverhalten des Regelkreises	366
7.4.1	Perfekte Regelung	366
7.4.2	Beschränkungen für die erreichbare Regelgüte bei einer Festwertregelung	367
7.4.3	Nichtminimalphasenverhalten von Regelkreisen	371
7.4.4	Gleichgewichtstheorem	371
7.4.5	Empfindlichkeit und Robustheit von Regelkreisen	378
7.4.6	Konsequenzen für den Reglerentwurf	382
7.5	Entwurf von Vorsteuerungen	384
7.5.1	Aufgaben der Folgeregelung	384
7.5.2	Inversionsbasierter Vorsteuerungsentwurf	385
7.5.3	Trajektorienplanung für Arbeitspunktwechsel	390
7.5.4	Vorsteuerung im stationären Zustand	394
7.6	Reglertypen und Richtlinien für die Wahl der Reglerstruktur	396
	Literaturhinweise	403

8	Stabilität rückgekoppelter Systeme	405
8.1	Zustandsstabilität	405
8.1.1	Definition der Zustandsstabilität	406
8.1.2	Kriterien für die Zustandsstabilität	408
8.2	Eingangs-Ausgangs-Stabilität	412
8.2.1	Definition der E/A-Stabilität	412
8.2.2	Kriterien für die E/A-Stabilität	413
8.2.3	Beziehungen zwischen Zustandsstabilität und E/A-Stabilität	415
8.3	Stabilitätsprüfung anhand des charakteristischen Polynoms	416
8.3.1	Vorgehensweise	416
8.3.2	Hurwitzkriterium	416
8.3.3	Routhkriterium	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	428
8.5.1	Herleitung der Stabilitätsbedingung	428
8.5.2	Nyquistkriterium	433
8.5.3	Beispiele	435
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	450
8.6.3	Nachweis der robusten Stabilität	453
8.7	Stabilitätsanalyse mit MATLAB	459
	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	495
10.3.1 Entwurfsverfahren	495
10.3.2 Regelung mit hoher Kreisverstärkung	501
10.3.3 Zusammenfassende Bewertung des Entwurfsverfahrens ..	502
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	542
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	555
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 Vermischte 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	591
Anhang 2: Kurze Einführung in MATLAB	687
Anhang 3: Aufgaben zur Prüfungsvorbereitung	697
Anhang 4: Projektaufgaben	701
Anhang 5: Verzeichnis der wichtigsten Formelzeichen	709
Anhang 6: Korrespondenztabelle der Laplacetransformation	711
Anhang 7: Fachwörter deutsch – englisch	713
Sachwortverzeichnis	717