

Jan Lunze

Regelungstechnik 1

Systemtheoretische Grundlagen, Analyse und
Entwurf einschleifiger Regelungen

9., überarbeitete Auflage

Mit 415 Abbildungen, 76 Beispielen,
165 Übungsaufgaben sowie einer Einführung in das
Programmsystem MATLAB

4y Springer Vieweg

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	Regelungsnormform.	155
5.3.6	Beobachtungsnormform.	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 i-Glieder... .	211
5.7.3	Kennwertermittlung für PT2-Glieder.	215
5.7.4	Kennwertermittlung für PTiT _i -Glieder.	217
5.8	MATLAB-Funktionen für die Analyse des Zeitverhaltens.	218
	Literaturhinweise.	224
	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
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

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	Führungsverhaltendes 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	Vernaschte 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