

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der Anwendungsbeispiele	XVII
Inhaltsübersicht des ersten Bandes	XXI
Hinweise zum Gebrauch des Buches	XXII

Teil 1: Analyse von Mehrgrößensystemen

1 Einführung in die Mehrgrößenregelung	1
1.1 Regelungsaufgaben mit mehreren Stell- und Regelgrößen	1
1.1.1 Charakteristika von Mehrgrößensystemen	1
1.1.2 Beispiele für Mehrgrößenregelungsaufgaben	4
1.2 Mehrgrößenregelkreis	8
1.2.1 Regelungsaufgabe	8
1.2.2 Regelkreisstrukturen	9
1.3 Probleme und Lösungsmethoden für Mehrgrößenregelungen	11
2 Beschreibung und Verhalten von Mehrgrößensystemen	13
2.1 Beschreibung von Mehrgrößensystemen im Zeitbereich	13
2.1.1 Differenzialgleichungen	13
2.1.2 Zustandsraummodell	14
2.1.3 Übergangsfunktionsmatrix und Gewichtsfunktionsmatrix ...	16
2.2 Beschreibung im Frequenzbereich	18
2.2.1 E/A-Beschreibung	18
2.2.2 Beschreibung des Übertragungsverhaltens mit Hilfe der ROSENBROCK-Systemmatrix	21
2.3 Strukturierte Beschreibungsformen	22
2.3.1 Reihen-, Parallel- und Rückführschaltungen	22
2.3.2 Systeme in P- und V-kanonischer Struktur	25
2.3.3 Beliebig verkoppelte Teilsysteme	28
2.4 Verhalten von Mehrgrößensystemen	35
2.4.1 Zeitverhalten	35

2.4.2	Verhalten im Frequenzbereich	41
2.4.3	Übergangsverhalten und stationäres Verhalten	43
2.5	Pole und Nullstellen	45
2.5.1	Pole	45
2.5.2	Übertragungsnullstellen	46
2.5.3	Invariante Nullstellen	50
2.6	Stabilität von Mehrgrößensystemen	54
2.7	MATLAB-Funktionen für die Analyse von Mehrgrößensystemen . .	56
	Literaturhinweise	59
3	Steuerbarkeit und Beobachtbarkeit	61
3.1	Steuerbarkeit	61
3.1.1	Problemstellung und Definition der Steuerbarkeit	61
3.1.2	Steuerbarkeitskriterium von KALMAN	63
3.1.3	Steuerbarkeit der kanonischen Normalform	70
3.1.4	Steuerbarkeitskriterium von HAUTUS	74
3.1.5	Nicht vollständig steuerbare Systeme	76
3.1.6	Erweiterungen	83
3.2	Beobachtbarkeit	86
3.2.1	Problemstellung und Definition der Beobachtbarkeit	86
3.2.2	Beobachtbarkeitskriterium von KALMAN	89
3.2.3	Dualität von Steuerbarkeit und Beobachtbarkeit	94
3.2.4	Weitere Beobachtbarkeitskriterien	95
3.2.5	Nicht vollständig beobachtbare Systeme	96
3.3	KALMAN-Zerlegung des Zustandsraummodells	101
3.4	Strukturelle Analyse linearer Systeme	109
3.4.1	Struktur dynamischer Systeme	109
3.4.2	Strukturelle Steuerbarkeit und strukturelle Beobachtbarkeit .	113
3.4.3	Strukturell feste Eigenwerte	120
3.5	Realisierbarkeit und Realisierung von Mehrgrößensystemen	126
3.6	MATLAB-Funktionen	132
	Literaturhinweise	133

Teil 2: Entwurf von Mehrgrößenreglern

4	Struktur und Eigenschaften von Mehrgrößenregelkreisen	135
4.1	Struktur von Mehrgrößenreglern	135
4.1.1	Zustands- und Ausgangsrückführungen	135
4.1.2	Dynamische Mehrgrößenregler	141
4.1.3	Dezentrale Regelung	145
4.2	Grundlegende Eigenschaften von Mehrgrößenregelkreisen	148
4.2.1	Pole und Nullstellen des Führungsverhaltens	148
4.2.2	Steuerbarkeit und Beobachtbarkeit des Regelkreises	152

4.3	Stabilität von Mehrgrößenregelkreisen	154
4.3.1	Stabilitätsanalyse anhand der Pole des Regelkreises	154
4.3.2	HSU-CHEN-Theorem	155
4.3.3	Nyquistkriterium für Mehrgrößensysteme	158
4.3.4	Stabilität bei kleiner Kreisverstärkung	162
4.3.5	Robuste Stabilität	164
4.4	Stationäres Verhalten von Regelkreisen	171
4.4.1	Sollwertfolge und Störunterdrückung	171
4.4.2	Entwurf von Vorfiltern zur Sicherung der Sollwertfolge	173
4.4.3	Störgrößenaufschaltung	175
4.4.4	PI-Mehrgrößenregler	176
4.4.5	Verallgemeinerte Folgeregung	178
4.5	Kriterien für die Wahl der Regelkreisstruktur	182
4.5.1	Auswahl von Stell- und Regelgrößen anhand der Pole und Nullstellen der Regelstrecke	182
4.5.2	Kopplungsanalyse einer dezentralen Regelung	183
4.5.3	Auswahl von Stellgrößen	186
4.5.4	Beispiele	188
	Literaturhinweise	196
5	Einstellregeln für PI-Mehrgrößenregler	197
5.1	Zielstellung	197
5.2	Gegenkopplungsbedingung für I-Mehrgrößenregler	198
5.3	Einstellung von I-Reglern	206
5.3.1	Idee der Reglereinstellung	206
5.3.2	Festlegung der Reglermatrix	207
5.3.3	Festlegung des Tuningfaktors	210
5.3.4	Erweiterung auf PI-Regler	213
5.3.5	Beispiel	214
5.4	Robustheit des eingestellten PI-Reglers	221
5.5	MATLAB-Programm zur Reglereinstellung	224
	Literaturhinweise	226
6	Reglerentwurf zur Polzuweisung	227
6.1	Zielstellung	227
6.2	Polzuweisung durch Zustandsrückführung	229
6.2.1	Polzuweisung für Systeme in Regelungsnormalform	229
6.2.2	Erweiterung auf beliebige Modellform	231
6.2.3	Diskussion der Lösung	233
6.2.4	Darstellung der Reglerparameter in Abhängigkeit von den Eigenwerten	238
6.3	Erweiterung auf Regelstrecken mit mehreren Stellgrößen	240
6.3.1	Dyadische Regelung	241
6.3.2	Vollständige Modale Synthese	243
6.4	Polzuweisung durch Ausgangsrückführung	246

6.4.1	Überlegungen zu den Freiheitsgraden von Ausgangsrückführungen	246
6.4.2	Näherung einer Zustandsrückführung durch eine Ausgangsrückführung	249
6.4.3	Ersetzen einer Zustandsrückführung durch einen dezentralen Regler	257
6.5	Polzuweisung durch dynamische Kompensation	265
6.6	MATLAB-Programme für den Entwurf zur Polzuweisung	267
	Literaturhinweise	270
7	Optimale Regelung	273
7.1	Grundgedanke der optimalen Regelung	273
7.2	Lösung des LQ-Problems	280
7.2.1	Umformung des Gütefunktional	280
7.2.2	Ableitung einer notwendigen Optimalitätsbedingung	282
7.2.3	Optimalreglergesetz	284
7.2.4	Lösung der Riccatigleichung	286
7.3	Eigenschaften des LQ-Regelkreises	288
7.3.1	Stabilität des Regelkreises	288
7.3.2	Eigenschaft der Rückfuhrdifferenzmatrix	288
7.3.3	Stabilitätsrand	290
7.3.4	Abhängigkeit der Eigenwerte des Regelkreises von den Wichtungsmatrizen	292
7.3.5	Diskussion der angegebenen Eigenschaften	294
7.4	Rechnergestützter Entwurf von LQ-Regelungen	294
7.4.1	Entwurfsalgorithmus	294
7.4.2	Wahl der Wichtungsmatrizen	295
7.4.3	Beispiele	298
7.5	Erweiterungen	303
7.6	Optimale Ausgangsrückführung	307
7.7	H^∞ -optimaler Regler	311
7.7.1	Erweiterungen der optimalen Regelung	311
7.7.2	H^∞ -Optimierungsproblem	312
7.7.3	Lösung des H^∞ -Optimierungsproblems	316
7.8	Optimalreglerentwurf mit MATLAB	320
	Literaturhinweise	322
8	Beobachterentwurf	325
8.1	Beobachtungsproblem	325
8.2	LUENBERGER-Beobachter	329
8.2.1	Struktur des Beobachters	329
8.2.2	Konvergenz des Beobachters	330
8.2.3	Wahl der Rückfuhrmatrix $\mathbf{L}$	331
8.2.4	Berechnung des Beobachters aus der Beobachtungsnormform	332

8.3	Realisierung einer Zustandsrückführung mit Hilfe eines Beobachters	333
8.3.1	Beschreibung des Regelkreises	333
8.3.2	Separationstheorem	334
8.3.3	Entwurfsverfahren	336
8.4	Reduzierter Beobachter	341
8.5	Weitere Anwendungsgebiete von Beobachtern	347
8.6	Beziehungen zwischen LUENBERGER-Beobachter und KALMAN-Filter	350
8.7	Beobachterentwurf mit MATLAB	353
	Literaturhinweise	355
9	Reglerentwurf mit dem Direkten Nyquistverfahren	357
9.1	Grundidee des Direkten Nyquistverfahrens	357
9.2	Stabilitätsanalyse unter Verwendung von Abschätzungen	358
9.2.1	Betrachtungen zum Nyquistkriterium	359
9.2.2	Abschätzung der Eigenwerte der Rückführdifferenzmatrix	360
9.2.3	Stabilitätsbedingung für ein dezentral geregeltes System	363
9.2.4	Integrität des Regelkreises	364
9.3	Entwurf mit dem Direkten Nyquistverfahren	365
9.4	Verbesserung der Analyse des Regelkreises	371
9.4.1	Ableitung einer Stabilitätsbedingung aus Robustheitsbetrachtungen	372
9.4.2	Abschätzung des E/A-Verhaltens des Regelkreises	376
9.5	Entkopplung der Regelkreise	384
9.6	Entwurfsdurchführung mit MATLAB	390
	Literaturhinweise	397

Teil 3: Digitale Regelung

10	Einführung in die digitale Regelung	399
10.1	Digitaler Regelkreis	399
10.2	Abtaster und Halteglied	401
10.2.1	Abtaster	401
10.2.2	Halteglied	407
10.2.3	Wahl der Abtastzeit	409
10.3	Vergleich von kontinuierlichem und zeitdiskretem Regelkreis	411
	Literaturhinweise	413
11	Beschreibung und Analyse zeitdiskreter Systeme im Zeitbereich	415
11.1	Beschreibung zeitdiskreter Systeme	415
11.1.1	Modellbildungsaufgabe	415
11.1.2	Beschreibung zeitdiskreter Systeme durch Differenzgleichungen	416

11.1.3 Zustandsraummodell	419
11.1.4 Ableitung des Zustandsraummodells aus der Differenzgleichung	422
11.1.5 Zeitdiskrete Systeme mit Totzeit	425
11.1.6 Ableitung des Zustandsraummodells eines Abtastsystems aus dem Modell des kontinuierlichen Systems	427
11.1.7 Kanonische Normalform	433
11.2 Verhalten zeitdiskreter Systeme	434
11.2.1 Lösung der Zustandsgleichung	434
11.2.2 Bewegungsgleichung in kanonischer Darstellung	436
11.2.3 Übergangsfolge und Gewichtsfolge	439
11.2.4 Darstellung des E/A-Verhaltens durch eine Faltungssumme ..	445
11.2.5 Übergangsverhalten und stationäres Verhalten	446
11.3 Steuerbarkeit und Beobachtbarkeit zeitdiskreter Systeme	449
11.3.1 Definitionen und Kriterien	449
11.3.2 Steuerbarkeitsanalyse	450
11.3.3 Beobachtbarkeitsanalyse	457
11.3.4 Weitere Ergebnisse zur Steuerbarkeit und Beobachtbarkeit ..	460
11.4 Pole und Nullstellen	461
11.5 Stabilität	463
11.5.1 Zustandsstabilität	463
11.5.2 E/A-Stabilität	467
11.6 MATLAB-Funktionen für die Analyse des Zeitverhaltens zeitdiskreter Systeme	469
Literaturhinweise	471
12 Beschreibung und Analyse zeitdiskreter Systeme im Frequenzbereich	473
12.1 $\mathcal{Z}$ -Transformation	473
12.1.1 Definition	473
12.1.2 Eigenschaften	477
12.2 $\mathcal{Z}$ -Übertragungsfunktion	481
12.2.1 Definition	481
12.2.2 Berechnung	482
12.2.3 Eigenschaften und grafische Darstellung	485
12.2.4 Pole und Nullstellen	488
12.2.5 Übertragungsfunktion zusammenschalteter Übertra- gungsglieder	491
12.3 MATLAB-Funktionen für die Analyse zeitdiskreter Systeme im Frequenzbereich	491
Literaturhinweise	492
13 Digitaler Regelkreis	493
13.1 Regelkreisstrukturen	493
13.2 Stabilitätsprüfung digitaler Regelkreise	495
13.2.1 Stabilitätsprüfung anhand der Pole des geschlossenen Kreises	495

13.2.2	Nyquistkriterium	496
13.3	Stationäres Verhalten digitaler Regelkreise	500
14	Entwurf von Abtastreglern	503
14.1	Entwurfsvorgehen	503
14.2	Zeitdiskrete Realisierung kontinuierlicher Regler	504
14.2.1	Approximation kontinuierlicher Regler durch Verwendung von Methoden der numerischen Integration	504
14.2.2	Approximation des PN-Bildes	511
14.2.3	Anwendungsgebiet	513
14.3	Reglerentwurf anhand des zeitdiskreten Streckenmodells	513
14.3.1	Entwurf einschleifiger Regelungen anhand des PN-Bildes des geschlossenen Kreises	513
14.3.2	Entwurf von Mehrgrößenreglern durch Polzuweisung	515
14.3.3	Zeitdiskrete optimale Regelung	516
14.3.4	Beobachter für zeitdiskrete Systeme	516
14.4	Regler mit endlicher Einstellzeit	517
14.5	MATLAB-Funktionen für den Entwurf digitaler Regler	522
	Literaturhinweise	523
15	Ausblick auf weiterführende Regelungskonzepte	525
	Literaturverzeichnis	527

Anhänge

Anhang 1: Lösung der Übungsaufgaben	533
Anhang 2: Matrizenrechnung	603
A2.1 Bezeichnungen und einfache Rechenregeln	603
A2.2 Eigenwerte und Eigenvektoren	605
A2.3 Singulärwertzerlegung	608
A2.4 Determinantensätze	610
A2.5 Normen von Vektoren und Matrizen	611
A2.6 Definitheit	612
A2.7 Lösung linearer Gleichungssysteme	613
A2.8 Nichtnegative Matrizen und M-Matrizen	613
Literaturhinweise	618
Anhang 3: MATLAB-Programme	619
A3.1 Funktionen für den Umgang mit Matrizen und Vektoren	619
A3.2 MATLAB-Funktionen für die Systemanalyse	620
A3.3 Funktionen für den Reglerentwurf	623
A3.4 Zusammenstellung der Programme	624

Anhang 4: Aufgaben zur Prüfungsvorbereitung	625
Anhang 5: Projektaufgaben	629
Anhang 6: Verzeichnis der wichtigsten Formelzeichen	637
Anhang 7: Korrespondenztabelle der Funktionaltransformationen	641
Anhang 8: Fachwörter deutsch – englisch	643
Sachwortverzeichnis	647