

Inhaltsverzeichnis

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

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 Mehrgrößenreglungsaufgaben	4
1.2 Mehrgrößenregelkreis	9
1.2.1 Regelungsaufgabe	9
1.2.2 Regelkreisstrukturen	10
1.3 Probleme und Lösungsmethoden für Mehrgrößenregelungen	12
Literaturhinweise	14
2 Beschreibung und Verhalten von Mehrgrößensystemen	15
2.1 Beschreibung von Mehrgrößensystemen im Zeitbereich	15
2.1.1 Differentialgleichungen	15
2.1.2 Zustandsraummodell	16
2.1.3 Übergangsfunktionsmatrix und Gewichtsfunktionsmatrix	18
2.2 Beschreibung im Frequenzbereich	20
2.2.1 E/A-Beschreibung	20
2.2.2 Beschreibung des Übertragungsverhaltens mit Hilfe der ROSEN BROCK-Systemmatrix	23
2.3 Strukturierte Beschreibungsformen	24
2.3.1 Reihen-, Parallel- und Rückführschaltungen	25
2.3.2 Systeme in P- und V-kanonischer Struktur	27
2.3.3 Beliebig verkoppelte Teilsysteme	29
2.4 Verhalten von Mehrgrößensystemen	37
2.4.1 Zeitverhalten	37
2.4.2 Verhalten im Frequenzbereich	43

2.4.3	Übergangsverhalten und stationäres Verhalten	45
2.5	Pole und Nullstellen	47
2.5.1	Pole	47
2.5.2	Übertragungsnullstellen	48
2.5.3	Invariante Nullstellen	52
2.6	Stabilität von Mehrgrößensystemen	57
2.7	MATLAB-Funktionen für die Analyse von Mehrgrößensystemen	58
	Literaturhinweise	62
3	Steuerbarkeit und Beobachtbarkeit	63
3.1	Steuerbarkeit	63
3.1.1	Problemstellung und Definition der Steuerbarkeit	63
3.1.2	Steuerbarkeitskriterium von KALMAN	65
3.1.3	Steuerbarkeit der kanonischen Normalform	77
3.1.4	Steuerbarkeitskriterium von HAUTUS	80
3.1.5	Nicht vollständig steuerbare Systeme	82
3.1.6	Erweiterungen	89
3.2	Beobachtbarkeit	91
3.2.1	Problemstellung und Definition der Beobachtbarkeit	91
3.2.2	Beobachtbarkeitskriterium von KALMAN	93
3.2.3	Dualität von Steuerbarkeit und Beobachtbarkeit	99
3.2.4	Weitere Beobachtbarkeitskriterien	99
3.2.5	Nicht vollständig beobachtbare Systeme	101
3.3	KALMAN-Zerlegung des Zustandsraummodells	107
3.4	Strukturelle Analyse linearer Systeme	115
3.4.1	Struktur dynamischer Systeme	115
3.4.2	Strukturelle Steuerbarkeit und strukturelle Beobachtbarkeit .	119
3.4.3	Strukturell feste Eigenwerte	125
3.4.4	Aussagekraft der strukturellen Analyse	128
3.5	Realisierbarkeit und Realisierung von Mehrgrößensystemen	135
3.6	MATLAB-Funktionen zur Steuerbarkeits- und Beobachtbarkeitsanalyse	141
	Literaturhinweise	142

Teil 2: Entwurf von Mehrgrößenreglern

4	Struktur und Eigenschaften von Mehrgrößenregelkreisen	143
4.1	Struktur von Mehrgrößenreglern	143
4.1.1	Zustands- und Ausgangsrückführungen	143
4.1.2	Dynamische Mehrgrößenregler	148
4.1.3	Dezentrale Regelung	153
4.2	Grundlegende Eigenschaften von Mehrgrößenregelkreisen	155
4.2.1	Pole und Nullstellen des Führungsverhaltens	155

4.2.2	Steuerbarkeit und Beobachtbarkeit des Regelkreises	159
4.3	Stabilität von Mehrgrößenregelkreisen	161
4.3.1	Stabilitätsanalyse anhand der Pole des Regelkreises	161
4.3.2	HSU-CHEN-Theorem	162
4.3.3	Nyquistkriterium für Mehrgrößensysteme	165
4.3.4	Stabilität bei kleiner Kreisverstärkung	169
4.3.5	Robuste Stabilität	171
4.4	Stationäres Verhalten von Regelkreisen	179
4.4.1	Führungsgrößengenerator und Störgrößengenerator	179
4.4.2	Vorfilterentwurf	180
4.4.3	Störgrößenaufschaltung	182
4.4.4	PI-Mehrgrößenregler	183
4.4.5	Inneres-Modell-Prinzip	185
4.4.6	Verallgemeinerte Servoregelung	189
4.5	Kriterien für die Wahl der Regelkreisstruktur	195
4.5.1	Auswahl von Stell- und Regelgrößen anhand der Pole und Nullstellen der Regelstrecke	195
4.5.2	Kopplungsanalyse einer dezentralen Regelung	196
4.5.3	Auswahl von Stellgrößen	199
4.5.4	Beispiele	201
	Literaturhinweise	209
5	Einstellregeln für PI-Mehrgrößenregler	211
5.1	Zielstellung	211
5.2	Gegenkopplungsbedingung für I-Mehrgrößenregler	213
5.3	Einstellung von I-Reglern	220
5.3.1	Idee der Reglereinstellung	220
5.3.2	Festlegung der Reglermatrix	221
5.3.3	Festlegung des Tuningfaktors	224
5.3.4	Erweiterung auf PI-Regler	227
5.3.5	Beispiel	228
5.4	Robustheit des eingestellten PI-Reglers	235
5.5	MATLAB-Programm zur Reglereinstellung	238
	Literaturhinweise	240
6	Reglerentwurf zur Polzuweisung	241
6.1	Zielstellung	241
6.2	Polzuweisung durch Zustandsrückführung	243
6.2.1	Polzuweisung für Systeme in Regelungsnormalform	243
6.2.2	Erweiterung auf beliebige Modellform	245
6.2.3	Diskussion der Lösung	247
6.2.4	Darstellung der Reglerparameter in Abhängigkeit von den Eigenwerten	252
6.3	Erweiterung auf Regelstrecken mit mehreren Stellgrößen	254
6.3.1	Dyadische Regelung	255

6.3.2	Vollständige Modale Synthese	257
6.4	Polzuweisung durch Ausgangsrückführung	260
6.4.1	Überlegungen zu den Freiheitsgraden von Ausgangsrückführungen	260
6.4.2	Ersetzen einer Zustandsrückführung durch eine äquivalente Ausgangsrückführung	263
6.4.3	Näherung einer Zustandsrückführung durch eine Ausgangsrückführung	264
6.4.4	Ersetzen einer Zustandsrückführung durch einen dezentralen Regler	271
6.5	MATLAB-Programme für den Entwurf zur Polzuweisung Literaturhinweise	279 283
7	Optimale Regelung	285
7.1	Grundgedanke der optimalen Regelung	285
7.2	Lösung des LQ-Problems	293
7.2.1	Umformung des Gütefunktional	293
7.2.2	Ableitung einer notwendigen Optimalitätsbedingung	295
7.2.3	Optimalreglergesetz	297
7.2.4	Lösung der Riccatigleichung	299
7.3	Eigenschaften des LQ-Regelkreises	300
7.3.1	Stabilität des Regelkreises	301
7.3.2	Eigenschaft der Rückführdifferenzmatrix	301
7.3.3	Stabilitätsrand	303
7.3.4	Abhängigkeit der Eigenwerte des Regelkreises von den Wichtungsmatrizen	305
7.3.5	Diskussion der angegebenen Eigenschaften	307
7.4	Rechnergestützter Entwurf von LQ-Regelungen	307
7.4.1	Entwurfsalgorithmus	307
7.4.2	Wahl der Wichtungsmatrizen	308
7.4.3	Beispiele	311
7.5	Erweiterungen	316
7.6	Optimale Ausgangsrückführung	320
7.7	H^∞ -optimaler Regler	325
7.7.1	Erweiterungen der optimalen Regelung	325
7.7.2	H^∞ -Optimierungsproblem	326
7.7.3	Lösung des H^∞ -Optimierungsproblems	330
7.8	Optimalreglerentwurf mit MATLAB Literaturhinweise	333 335
8	Beobachterentwurf	337
8.1	Beobachtungsproblem	337
8.2	LUENBERGER-Beobachter	341
8.2.1	Struktur des Beobachters	341
8.2.2	Konvergenz des Beobachters	343

8.2.3	Wahl der Rückführmatrix L	343
8.2.4	Berechnung des Beobachters aus der Beobachtungsnormalform	344
8.2.5	Störverhalten des Beobachters	345
8.3	Realisierung einer Zustandsrückführung mit Hilfe eines Beobachters	347
8.3.1	Beschreibung des Regelkreises	347
8.3.2	Séparationstheorem	348
8.3.3	Entwurfsverfahren	350
8.4	Reduzierter Beobachter	357
8.5	Weitere Anwendungsbereiche von Beobachtern	362
8.6	Beziehungen zwischen LUENBERGER-Beobachter und KALMAN-Filter	365
8.7	Beobachterentwurf mit MATLAB	368
	Literaturhinweise	370
9	Reglerentwurf mit dem Direkten Nyquistverfahren	371
9.1	Grundidee des Direkten Nyquistverfahrens	371
9.2	Stabilitätsanalyse unter Verwendung von Abschätzungen	372
9.2.1	Betrachtungen zum Nyquistkriterium	373
9.2.2	Abschätzung der Eigenwerte der Rückführdifferenzmatrix	375
9.2.3	Stabilitätsbedingung für ein dezentral geregeltes System	378
9.2.4	Integrität des Regelkreises	379
9.3	Entwurf mit dem Direkten Nyquistverfahren	380
9.4	Verbesserung der Analyse des Regelkreises	386
9.4.1	Ableitung einer Stabilitätsbedingung aus Robustheitsbetrachtungen	387
9.4.2	Abschätzung des E/A-Verhaltens des Regelkreises	391
9.5	Entkopplung der Regelkreise	400
9.6	Entwurfsdurchführung mit MATLAB	405
	Literaturhinweise	411

Teil 3: Digitale Regelung

10	Einführung in die digitale Regelung	415
10.1	Digitaler Regelkreis	415
10.2	Abtaster und Halteglied	417
10.2.1	Abtaster	417
10.2.2	Halteglied	424
10.2.3	Wahl der Abtastzeit	426
10.3	Vergleich von kontinuierlichem und zeitdiskretem Regelkreis	428
	Literaturhinweise	430

11	Beschreibung und Analyse zeitdiskreter Systeme im Zeitbereich	431
11.1	Beschreibung zeitdiskreter Systeme	431
11.1.1	Modellbildungsaufgabe	431
11.1.2	Beschreibung zeitdiskreter Systeme durch Differenzengleichungen	432
11.1.3	Zustandsraummodell	436
11.1.4	Ableitung des Zustandsraummodells aus der Differenzengleichung	438
11.1.5	Zeitdiskrete Systeme mit Totzeit	441
11.1.6	Ableitung des Zustandsraummodells eines Abtastsystems aus dem Modell des kontinuierlichen Systems	443
11.1.7	Kanonische Normalform	450
11.2	Verhalten zeitdiskreter Systeme	451
11.2.1	Lösung der Zustandsgleichung	451
11.2.2	Bewegungsgleichung in kanonischer Darstellung	452
11.2.3	Übergangsfolge und Gewichtsfolge	455
11.2.4	Darstellung des E/A-Verhaltens durch eine Faltungssumme	462
11.2.5	Übergangsverhalten und stationäres Verhalten	463
11.3	Steuerbarkeit und Beobachtbarkeit zeitdiskreter Systeme	466
11.3.1	Definitionen und Kriterien	466
11.3.2	Steuerbarkeitsanalyse	467
11.3.3	Beobachtbarkeitsanalyse	476
11.3.4	Weitere Ergebnisse zur Steuerbarkeit und Beobachtbarkeit	479
11.4	Pole und Nullstellen	480
11.5	Stabilität	482
11.5.1	Zustandsstabilität	482
11.5.2	E/A-Stabilität	486
11.6	MATLAB-Funktionen für die Analyse zeitdiskreter Systeme im Zeitbereich	488
	Literaturhinweise	490
12	Beschreibung und Analyse zeitdiskreter Systeme im Frequenzbereich	491
12.1	Z -Transformation	491
12.1.1	Definition	491
12.1.2	Eigenschaften	496
12.2	Z -Übertragungsfunktion	499
12.2.1	Definition	499
12.2.2	Berechnung	500
12.2.3	Eigenschaften und grafische Darstellung	503
12.2.4	Pole und Nullstellen	506
12.2.5	Übertragungsfunktion zusammengeschalteter Übertragungsglieder	510
12.3	MATLAB-Funktionen für die Analyse zeitdiskreter Systeme im Frequenzbereich	510
	Literaturhinweise	511

13	Digitaler Regelkreis	513
13.1	Regelkreisstrukturen	513
13.2	Stabilitätsprüfung digitaler Regelkreise	515
13.2.1	Stabilitätsprüfung anhand der Pole des geschlossenen Kreises	515
13.2.2	Nyquistkriterium	516
13.3	Stationäres Verhalten digitaler Regelkreise	520
14	Entwurf von Abtastreglern	523
14.1	Entwurfsvorgehen	523
14.2	Zeitdiskrete Realisierung kontinuierlicher Regler	524
14.2.1	Approximation kontinuierlicher Regler durch Verwendung von Methoden der numerischen Integration	524
14.2.2	Approximation des PN-Bildes	531
14.2.3	Anwendungsgebiet	533
14.3	Reglerentwurf anhand des zeitdiskreten Streckenmodells	533
14.3.1	Entwurf einschleifiger Regelungen anhand des PN-Bildes des geschlossenen Kreises	533
14.3.2	Entwurf von Mehrgrößenreglern durch Polzuweisung	535
14.3.3	Zeitdiskrete optimale Regelung	536
14.3.4	Beobachter für zeitdiskrete Systeme	537
14.4	Regler mit endlicher Einstellzeit	538
14.5	MATLAB-Funktionen für den Entwurf digitaler Regler	547
	Literaturhinweise	547
15	Ausblick auf weiterführende Regelungskonzepte	549
	Literaturverzeichnis	551

Anhänge

Anhang 1: Lösung der Übungsaufgaben	557
Anhang 2: Matrizenrechnung	627
A2.1 Bezeichnungen und einfache Rechenregeln	627
A2.2 Eigenwerte und Eigenvektoren	629
A2.3 Singulärwertzerlegung	633
A2.4 Determinantsätze	634
A2.5 Normen von Vektoren und Matrizen	635
A2.6 Definitheit	636
A2.7 Lösung linearer Gleichungssysteme	637
A2.8 Nichtnegative Matrizen und M-Matrizen	638
Literaturhinweise	643

Anhang 3: MATLAB-Programme	645
A3.1 Funktionen für den Umgang mit Matrizen und Vektoren	645
A3.2 MATLAB-Funktionen für die Systemanalyse	646
A3.3 Funktionen für den Reglerentwurf	649
A3.4 Zusammenstellung der Programme	650
Anhang 4: Aufgaben zur Prüfungsvorbereitung	651
Anhang 5: Projektaufgaben	655
Anhang 6: Verzeichnis der wichtigsten Formelzeichen	665
Anhang 7: Korrespondenztabelle der Laplace- und Z-Transformation	669
Anhang 8: Fachwörter deutsch – englisch	671
Sachwortverzeichnis	677