

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 Mehrgrößenregelungsaufgaben	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	Differenzialgleichungen	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 ROSENBROCK-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	36
2.4.1	Zeitverhalten	37
2.4.2	Verhalten im Frequenzbereich	43

2.4.3	Übergangsverhalten und stationäres Verhalten	44
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	56
2.7	MATLAB-Funktionen für die Analyse von Mehrgrößensystemen ..	58
	Literaturhinweise	61
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	106
3.4	Strukturelle Analyse linearer Systeme	114
3.4.1	Struktur dynamischer Systeme	114
3.4.2	Strukturelle Steuerbarkeit und strukturelle Beobachtbarkeit ..	118
3.4.3	Strukturell feste Eigenwerte	124
3.5	Realisierbarkeit und Realisierung von Mehrgrößensystemen	130
3.6	MATLAB-Funktionen zur Steuerbarkeits- und Beobachtbarkeitsanalyse	136
	Literaturhinweise	137

Teil 2: Entwurf von Mehrgrößenreglern

4	Struktur und Eigenschaften von Mehrgrößenregelkreisen	139
4.1	Struktur von Mehrgrößenreglern	139
4.1.1	Zustands- und Ausgangsrückführungen	139
4.1.2	Dynamische Mehrgrößenregler	144
4.1.3	Dezentrale Regelung	149
4.2	Grundlegende Eigenschaften von Mehrgrößenregelkreisen	151
4.2.1	Pole und Nullstellen des Führungsverhaltens	151
4.2.2	Steuerbarkeit und Beobachtbarkeit des Regelkreises	155

4.3	Stabilität von Mehrgrößenregelkreisen	157
4.3.1	Stabilitätsanalyse anhand der Pole des Regelkreises	157
4.3.2	HSU-CHEN-Theorem	158
4.3.3	Nyquistkriterium für Mehrgrößensysteme	161
4.3.4	Stabilität bei kleiner Kreisverstärkung	165
4.3.5	Robuste Stabilität	167
4.4	Stationäres Verhalten von Regelkreisen	174
4.4.1	Führungsgrößengenerator und Störgrößengenerator	174
4.4.2	Vorfilterentwurf	176
4.4.3	Störgrößenaufschaltung	178
4.4.4	PI-Mehrgrößenregler	179
4.4.5	Inneres-Modell-Prinzip	181
4.4.6	Verallgemeinerte Servoregelung	185
4.5	Kriterien für die Wahl der Regelkreisstruktur	191
4.5.1	Auswahl von Stell- und Regelgrößen anhand der Pole und Nullstellen der Regelstrecke	191
4.5.2	Kopplungsanalyse einer dezentralen Regelung	192
4.5.3	Auswahl von Stellgrößen	195
4.5.4	Beispiele	197
	Literaturhinweise	205
5	Einstellregeln für PI-Mehrgrößenregler	207
5.1	Zielstellung	207
5.2	Gegenkopplungsbedingung für I-Mehrgrößenregler	209
5.3	Einstellung von I-Reglern	216
5.3.1	Idee der Reglereinstellung	216
5.3.2	Festlegung der Reglermatrix	217
5.3.3	Festlegung des Tuningfaktors	220
5.3.4	Erweiterung auf PI-Regler	223
5.3.5	Beispiel	224
5.4	Robustheit des eingestellten PI-Reglers	231
5.5	MATLAB-Programm zur Reglereinstellung	234
	Literaturhinweise	236
6	Reglerentwurf zur Polzuweisung	237
6.1	Zielstellung	237
6.2	Polzuweisung durch Zustandsrückführung	239
6.2.1	Polzuweisung für Systeme in Regulationsnormalform	239
6.2.2	Erweiterung auf beliebige Modellform	242
6.2.3	Diskussion der Lösung	244
6.2.4	Darstellung der Reglerparameter in Abhängigkeit von den Eigenwerten	248
6.3	Erweiterung auf Regelstrecken mit mehreren Stellgrößen	250
6.3.1	Dyadische Regelung	251
6.3.2	Vollständige Modale Synthese	253

6.4	Polzuweisung durch Ausgangsrückführung	256
6.4.1	Überlegungen zu den Freiheitsgraden von Ausgangsrückführungen	256
6.4.2	Ersetzen einer Zustandsrückführung durch eine äquivalente Ausgangsrückführung	259
6.4.3	Näherung einer Zustandsrückführung durch eine Ausgangsrückführung	260
6.4.4	Ersetzen einer Zustandsrückführung durch einen dezentralen Regler	267
6.5	MATLAB-Programme für den Entwurf zur Polzuweisung	276
	Literaturhinweise	279
7	Optimale Regelung	281
7.1	Grundgedanke der optimalen Regelung	281
7.2	Lösung des LQ-Problems	289
7.2.1	Umformung des Gütefunktional	289
7.2.2	Ableitung einer notwendigen Optimalitätsbedingung	291
7.2.3	Optimalreglergesetz	293
7.2.4	Lösung der Riccatigleichung	295
7.3	Eigenschaften des LQ-Regelkreises	296
7.3.1	Stabilität des Regelkreises	297
7.3.2	Eigenschaft der Rückführdifferenzmatrix	297
7.3.3	Stabilitätsrand	299
7.3.4	Abhängigkeit der Eigenwerte des Regelkreises von den Wichtungsmatrizen	301
7.3.5	Diskussion der angegebenen Eigenschaften	303
7.4	Rechnergestützter Entwurf von LQ-Regelungen	303
7.4.1	Entwurfsalgorithmus	303
7.4.2	Wahl der Wichtungsmatrizen	304
7.4.3	Beispiele	307
7.5	Erweiterungen	312
7.6	Optimale Ausgangsrückführung	316
7.7	H^∞ -optimaler Regler	321
7.7.1	Erweiterungen der optimalen Regelung	321
7.7.2	H^∞ -Optimierungsproblem	322
7.7.3	Lösung des H^∞ -Optimierungsproblems	326
7.8	Optimalreglerentwurf mit MATLAB	329
	Literaturhinweise	331
8	Beobachterentwurf	333
8.1	Beobachtungsproblem	333
8.2	LUENBERGER-Beobachter	337
8.2.1	Struktur des Beobachters	337
8.2.2	Konvergenz des Beobachters	339
8.2.3	Wahl der Rückführmatrix L	339

8.2.4	Berechnung des Beobachters aus der Beobachtungsnormalform	340
8.2.5	Störverhalten des Beobachters	341
8.3	Realisierung einer Zustandsrückführung mit Hilfe eines Beobachters	343
8.3.1	Beschreibung des Regelkreises	343
8.3.2	Separationstheorem	344
8.3.3	Entwurfsverfahren	346
8.4	Reduzierter Beobachter	353
8.5	Weitere Anwendungsgebiete von Beobachtern	358
8.6	Beziehungen zwischen LUENBERGER-Beobachter und KALMAN-Filter	361
8.7	Beobachterentwurf mit MATLAB	364
	Literaturhinweise	366
9	Reglerentwurf mit dem Direkten Nyquistverfahren	367
9.1	Grundidee des Direkten Nyquistverfahrens	367
9.2	Stabilitätsanalyse unter Verwendung von Abschätzungen	368
9.2.1	Betrachtungen zum Nyquistkriterium	369
9.2.2	Abschätzung der Eigenwerte der Rückführdifferenzmatrix ..	371
9.2.3	Stabilitätsbedingung für ein dezentral geregeltes System ...	373
9.2.4	Integrität des Regelkreises	375
9.3	Entwurf mit dem Direkten Nyquistverfahren	376
9.4	Verbesserung der Analyse des Regelkreises	382
9.4.1	Ableitung einer Stabilitätsbedingung aus Robustheitsbetrachtungen	383
9.4.2	Abschätzung des E/A-Verhaltens des Regelkreises	387
9.5	Entkopplung der Regelkreise	395
9.6	Entwurfsdurchführung mit MATLAB	400
	Literaturhinweise	407

Teil 3: Digitale Regelung

10	Einführung in die digitale Regelung	409
10.1	Digitaler Regelkreis	409
10.2	Abtaster und Halteglied	411
10.2.1	Abtaster	411
10.2.2	Halteglied	418
10.2.3	Wahl der Abtastzeit	420
10.3	Vergleich von kontinuierlichem und zeitdiskretem Regelkreis	422
	Literaturhinweise	424

11	Beschreibung und Analyse zeitdiskreter Systeme im Zeitbereich	425
11.1	Beschreibung zeitdiskreter Systeme	425
11.1.1	Modellbildungsaufgabe	425
11.1.2	Beschreibung zeitdiskreter Systeme durch Differenzengleichungen	426
11.1.3	Zustandsraummodell	430
11.1.4	Ableitung des Zustandsraummodells aus der Differenzengleichung	432
11.1.5	Zeitdiskrete Systeme mit Totzeit	435
11.1.6	Ableitung des Zustandsraummodells eines Abtastsystems aus dem Modell des kontinuierlichen Systems	437
11.1.7	Kanonische Normalform	444
11.2	Verhalten zeitdiskreter Systeme	445
11.2.1	Lösung der Zustandsgleichung	445
11.2.2	Bewegungsgleichung in kanonischer Darstellung	447
11.2.3	Übergangsfolge und Gewichtsfolge	450
11.2.4	Darstellung des E/A-Verhaltens durch eine Faltungssumme	456
11.2.5	Übergangsverhalten und stationäres Verhalten	457
11.3	Steuerbarkeit und Beobachtbarkeit zeitdiskreter Systeme	460
11.3.1	Definitionen und Kriterien	460
11.3.2	Steuerbarkeitsanalyse	461
11.3.3	Beobachtbarkeitsanalyse	470
11.3.4	Weitere Ergebnisse zur Steuerbarkeit und Beobachtbarkeit	473
11.4	Pole und Nullstellen	474
11.5	Stabilität	476
11.5.1	Zustandsstabilität	476
11.5.2	E/A-Stabilität	480
11.6	MATLAB-Funktionen für die Analyse zeitdiskreter Systeme im Zeitbereich	482
	Literaturhinweise	484
12	Beschreibung und Analyse zeitdiskreter Systeme im Frequenzbereich	485
12.1	Z -Transformation	485
12.1.1	Definition	485
12.1.2	Eigenschaften	490
12.2	Z -Übertragungsfunktion	493
12.2.1	Definition	493
12.2.2	Berechnung	494
12.2.3	Eigenschaften und grafische Darstellung	497
12.2.4	Pole und Nullstellen	500
12.2.5	Übertragungsfunktion zusammengesetzter Übertragungsglieder	504
12.3	MATLAB-Funktionen für die Analyse zeitdiskreter Systeme im Frequenzbereich	504
	Literaturhinweise	505

13	Digitaler Regelkreis	507
13.1	Regelkreisstrukturen	507
13.2	Stabilitätsprüfung digitaler Regelkreise	509
13.2.1	Stabilitätsprüfung anhand der Pole des geschlossenen Kreises	509
13.2.2	Nyquistkriterium	510
13.3	Stationäres Verhalten digitaler Regelkreise	514
14	Entwurf von Abtastreglern	517
14.1	Entwurfsvorgehen	517
14.2	Zeitdiskrete Realisierung kontinuierlicher Regler	518
14.2.1	Approximation kontinuierlicher Regler durch Verwendung von Methoden der numerischen Integration	518
14.2.2	Approximation des PN-Bildes	525
14.2.3	Anwendungsgebiet	527
14.3	Reglerentwurf anhand des zeitdiskreten Streckenmodells	527
14.3.1	Entwurf einschleifiger Regelungen anhand des PN-Bildes des geschlossenen Kreises	527
14.3.2	Entwurf von Mehrgrößenreglern durch Polzuweisung	529
14.3.3	Zeitdiskrete optimale Regelung	530
14.3.4	Beobachter für zeitdiskrete Systeme	531
14.4	Regler mit endlicher Einstellzeit	532
14.5	MATLAB-Funktionen für den Entwurf digitaler Regler	541
	Literaturhinweise	541
15	Ausblick auf weiterführende Regelungskonzepte	543
	Literaturverzeichnis	545

Anhänge

Anhang 1:	Lösung der Übungsaufgaben	551
Anhang 2:	Matrizenrechnung	621
A2.1	Bezeichnungen und einfache Rechenregeln	621
A2.2	Eigenwerte und Eigenvektoren	623
A2.3	Singulärwertzerlegung	626
A2.4	Determinantensätze	628
A2.5	Normen von Vektoren und Matrizen	629
A2.6	Definitheit	630
A2.7	Lösung linearer Gleichungssysteme	631
A2.8	Nichtnegative Matrizen und M-Matrizen	631
	Literaturhinweise	636

Anhang 3: MATLAB-Programme	637
A3.1 Funktionen für den Umgang mit Matrizen und Vektoren	637
A3.2 MATLAB-Funktionen für die Systemanalyse	638
A3.3 Funktionen für den Reglerentwurf	641
A3.4 Zusammenstellung der Programme	641
Anhang 4: Aufgaben zur Prüfungsvorbereitung	643
Anhang 5: Projektaufgaben	647
Anhang 6: Verzeichnis der wichtigsten Formelzeichen	655
Anhang 7: Korrespondenztabelle der Funktionaltransformationen	659
Anhang 8: Fachwörter deutsch – englisch	661
Sachwortverzeichnis	667