

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 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 ROSENBROCK-Systemmatrix	23
2.3 Strukturierte Beschreibungsformen	24
2.3.1 Reihen-, Parallel- und Rückführschaltungen	24
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	36
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	47
2.5.3	Invariante Nullstellen	51
2.6	Stabilität von Mehrgrößensystemen	57
2.7	MATLAB-Funktionen für die Analyse von Mehrgrößensystemen ..	59
	Literaturhinweise	62
3	Steuerbarkeit und Beobachtbarkeit	65
3.1	Steuerbarkeit	65
3.1.1	Problemstellung und Definition der Steuerbarkeit	65
3.1.2	Steuerbarkeitskriterium von KALMAN	67
3.1.3	Steuerbarkeit der kanonischen Normalform	78
3.1.4	Steuerbarkeitskriterium von HAUTUS	82
3.1.5	Nicht vollständig steuerbare Systeme	84
3.1.6	Erweiterungen	91
3.2	Beobachtbarkeit	93
3.2.1	Problemstellung und Definition der Beobachtbarkeit	93
3.2.2	Beobachtbarkeitskriterium von KALMAN	95
3.2.3	Dualität von Steuerbarkeit und Beobachtbarkeit	101
3.2.4	Weitere Beobachtbarkeitskriterien	101
3.2.5	Nicht vollständig beobachtbare Systeme	103
3.3	KALMAN-Zerlegung des Zustandsraummodells	109
3.4	Strukturelle Analyse linearer Systeme	117
3.4.1	Struktur dynamischer Systeme	117
3.4.2	Beziehungen zwischen strukturellen und numerischen Eigenschaften	121
3.4.3	Strukturelle Steuerbarkeit und strukturelle Beobachtbarkeit ..	123
3.4.4	Strukturell feste Eigenwerte	131
3.4.5	Aussagekraft der strukturellen Analyse	135
3.5	Realisierbarkeit und Realisierung von Mehrgrößensystemen	140
3.6	MATLAB-Funktionen zur Steuerbarkeits- und Beobachtbarkeitsanalyse	147
	Literaturhinweise	147

Teil 2: Entwurf von Mehrgrößenreglern

4	Struktur und Eigenschaften von Mehrgrößenregelkreisen	149
4.1	Struktur von Mehrgrößenreglern	149
4.1.1	Zustands- und Ausgangsrückführungen	149
4.1.2	Dynamische Mehrgrößenregler	154
4.1.3	Dezentrale Regelung	159
4.2	Grundlegende Eigenschaften von Mehrgrößenregelkreisen	161

4.2.1	Pole und Nullstellen des Führungsverhaltens	161
4.2.2	Steuerbarkeit und Beobachtbarkeit des Regelkreises	166
4.3	Stabilität von Mehrgrößenregelkreisen	168
4.3.1	Stabilitätsanalyse anhand der Pole des Regelkreises	168
4.3.2	HSU-CHEN-Theorem	169
4.3.3	Nyquistkriterium für Mehrgrößensysteme	171
4.3.4	Stabilität bei kleiner Kreisverstärkung	175
4.3.5	Robuste Stabilität	177
4.4	Stationäres Verhalten von Regelkreisen	185
4.4.1	Führungsgrößengenerator und Störgrößengenerator	185
4.4.2	Vorfilterentwurf	186
4.4.3	Störgrößenaufschaltung	189
4.4.4	PI-Mehrgrößenregler	190
4.4.5	Inneres-Modell-Prinzip	192
4.4.6	Verallgemeinerte Servoregelung	196
4.5	Kriterien für die Wahl der Regelkreisstruktur	202
4.5.1	Auswahl von Stell- und Regelgrößen anhand der Pole und Nullstellen der Regelstrecke	202
4.5.2	Kopplungsanalyse einer dezentralen Regelung	203
4.5.3	Auswahl von Stellgrößen	206
4.5.4	Beispiele	208
	Literaturhinweise	216
5	Einstellregeln für PI-Mehrgrößenregler	219
5.1	Zielstellung	219
5.2	Gegenkopplungsbedingung für I-Mehrgrößenregler	221
5.3	Einstellung von I-Reglern	228
5.3.1	Idee der Reglereinstellung	228
5.3.2	Festlegung der Reglermatrix	229
5.3.3	Festlegung des Tuningfaktors	232
5.3.4	Erweiterung auf PI-Regler	235
5.3.5	Beispiel	237
5.4	Robustheit des eingestellten PI-Reglers	243
5.5	MATLAB-Programm zur Reglereinstellung	247
	Literaturhinweise	247
6	Reglerentwurf zur Polzuweisung	249
6.1	Zielstellung	249
6.2	Polzuweisung durch Zustandsrückführung	251
6.2.1	Polzuweisung für Systeme in Regelungsnormform	251
6.2.2	Erweiterung auf beliebige Modellform	253
6.2.3	Diskussion der Lösung	255
6.2.4	Darstellung der Reglerparameter in Abhängigkeit von den Eigenwerten	260
6.3	Erweiterung auf Regelstrecken mit mehreren Stellgrößen	262

6.3.1	Dyadische Regelung	263
6.3.2	Vollständige Modale Synthese	265
6.4	Polzuweisung durch Ausgangsrückführung	268
6.4.1	Überlegungen zu den Freiheitsgraden von Ausgangsrückführungen	268
6.4.2	Ersetzen einer Zustandsrückführung durch eine äquivalente Ausgangsrückführung	271
6.4.3	Näherung einer Zustandsrückführung durch eine Ausgangsrückführung	272
6.4.4	Ersetzen einer Zustandsrückführung durch einen dezentralen Regler	279
6.5	MATLAB-Programme für den Entwurf zur Polzuweisung	288
	Literaturhinweise	291
7	Optimale Regelung	293
7.1	Grundgedanke der optimalen Regelung	293
7.2	Lösung des LQ-Problems	301
7.2.1	Umformung des Gütefunktionalen	301
7.2.2	Ableitung einer notwendigen Optimalitätsbedingung	303
7.2.3	Optimalreglergesetz	305
7.2.4	Lösung der Riccati-Gleichung	306
7.3	Eigenschaften des LQ-Regelkreises	308
7.3.1	Stabilität des Regelkreises	308
7.3.2	Eigenschaft der Rückführdifferenzmatrix	309
7.3.3	Stabilitätsrand	311
7.3.4	Abhängigkeit der Eigenwerte des Regelkreises von den Wichtungsmatrizen	313
7.3.5	Diskussion der angegebenen Eigenschaften	314
7.4	Rechnergestützter Entwurf von LQ-Regelungen	315
7.4.1	Entwurfalgorithmus	315
7.4.2	Wahl der Wichtungsmatrizen	316
7.4.3	Beispiele	319
7.5	Erweiterungen	324
7.6	Optimale Ausgangsrückführung	328
7.7	H^∞ -optimaler Regler	332
7.7.1	Erweiterungen der optimalen Regelung	332
7.7.2	H^∞ -Optimierungsproblem	333
7.7.3	Lösung des H^∞ -Optimierungsproblems	337
7.8	Optimalreglerentwurf mit MATLAB	341
	Literaturhinweise	343
8	Beobachterentwurf	345
8.1	Beobachtungsproblem	345
8.2	LUENBERGER-Beobachter	349
8.2.1	Struktur des Beobachters	349

8.2.2	Konvergenz des Beobachters	351
8.2.3	Wahl der Rückführmatrix L	351
8.2.4	Berechnung des Beobachters aus der Beobachtungsnormalform	352
8.2.5	Störverhalten des Beobachters	353
8.3	Realisierung einer Zustandsrückführung mit Hilfe eines Beobachters	355
8.3.1	Beschreibung des Regelkreises	355
8.3.2	Separationstheorem	357
8.3.3	Entwurfsverfahren	358
8.4	Reduzierter Beobachter	365
8.4.1	Zielsetzung	365
8.4.2	Ableitung der Beobachtergleichungen	365
8.4.3	Regelkreis mit reduziertem Beobachter	368
8.5	Weitere Anwendungsgebiete von Beobachtern	371
8.6	Beziehungen zwischen LUENBERGER-Beobachter und KALMAN-Filter	373
8.7	Beobachterentwurf mit MATLAB	377
	Literaturhinweise	379
9	Reglerentwurf mit dem Direkten Nyquistverfahren	381
9.1	Grundidee des Direkten Nyquistverfahrens	381
9.2	Stabilitätsanalyse unter Verwendung von Abschätzungen	383
9.2.1	Betrachtungen zum Nyquistkriterium	383
9.2.2	Abschätzung der Eigenwerte der Rückführdifferenzmatrix ..	385
9.2.3	Stabilitätsbedingung für ein dezentral geregeltes System ...	388
9.2.4	Integrität des Regelkreises	389
9.3	Entwurf mit dem Direkten Nyquistverfahren	391
9.4	Verbesserung der Analyse des Regelkreises	397
9.4.1	Ableitung einer Stabilitätsbedingung aus Robustheitsbetrachtungen	397
9.4.2	Abschätzung des E/A-Verhaltens des Regelkreises	402
9.5	Entkopplung der Regelkreise	410
9.6	Entwurf durchführung mit MATLAB	416
	Literaturhinweise	422

Teil 3: Digitale Regelung

10	Einführung in die digitale Regelung	425
10.1	Digitaler Regelkreis	425
10.2	Abtaster und Halteglied	427
10.2.1	Abtaster	427
10.2.2	Halteglied	434

10.2.3	Wahl der Abtastzeit	436
10.3	Vergleich von kontinuierlichem und zeitdiskretem Regelkreis	438
	Literaturhinweise	440
11	Beschreibung und Analyse zeitdiskreter Systeme im Zeitbereich	441
11.1	Beschreibung zeitdiskreter Systeme	441
11.1.1	Modellbildungsaufgabe	441
11.1.2	Beschreibung zeitdiskreter Systeme durch Differenzgleichungen	442
11.1.3	Zustandsraummodell	446
11.1.4	Ableitung des Zustandsraummodells aus der Differenzgleichung	448
11.1.5	Zeitdiskrete Systeme mit Totzeit	451
11.1.6	Ableitung des Zustandsraummodells eines Abtastsystems aus dem Modell des kontinuierlichen Systems	453
11.1.7	Kanonische Normalform	460
11.2	Verhalten zeitdiskreter Systeme	461
11.2.1	Lösung der Zustandsgleichung	461
11.2.2	Bewegungsgleichung in kanonischer Darstellung	462
11.2.3	Übergangsfolge und Gewichtsfolge	465
11.2.4	Darstellung des E/A-Verhaltens durch eine Faltungssumme ..	472
11.2.5	Übergangsverhalten und stationäres Verhalten	473
11.3	Steuerbarkeit und Beobachtbarkeit zeitdiskreter Systeme	476
11.3.1	Definitionen und Kriterien	476
11.3.2	Steuerbarkeitsanalyse	477
11.3.3	Beobachtbarkeitsanalyse	485
11.3.4	Weitere Ergebnisse zur Steuerbarkeit und Beobachtbarkeit ..	489
11.4	Pole und Nullstellen	490
11.5	Stabilität	492
11.5.1	Zustandsstabilität	492
11.5.2	E/A-Stabilität	495
11.6	MATLAB-Funktionen für die Analyse zeitdiskreter Systeme im Zeitbereich	498
	Literaturhinweise	500
12	Beschreibung und Analyse zeitdiskreter Systeme im Frequenzbereich	501
12.1	\mathcal{Z} -Transformation	501
12.1.1	Definition	501
12.1.2	Eigenschaften	507
12.2	\mathcal{Z} -Übertragungsfunktion	509
12.2.1	Definition	509
12.2.2	Berechnung	511
12.2.3	Eigenschaften und grafische Darstellung	514
12.2.4	Pole und Nullstellen	516

12.2.5 Übertragungsfunktion zusammenschalteter Übertragungsglieder	520
12.3 MATLAB-Funktionen für die Analyse zeitdiskreter Systeme im Frequenzbereich	520
Literaturhinweise	521
13 Digitaler Regelkreis	523
13.1 Regelkreisstrukturen	523
13.2 Stabilitätsprüfung digitaler Regelkreise	525
13.2.1 Stabilitätsprüfung anhand der Pole des geschlossenen Kreises	525
13.2.2 Nyquistkriterium	526
13.3 Stationäres Verhalten digitaler Regelkreise	530
14 Entwurf von Abtastreglern	533
14.1 Entwurfsvorgehen	533
14.2 Zeitdiskrete Realisierung kontinuierlicher Regler	534
14.2.1 Approximation kontinuierlicher Regler durch Verwendung von Methoden der numerischen Integration	534
14.2.2 Approximation des PN-Bildes	541
14.2.3 Anwendungsgebiet	543
14.3 Reglerentwurf anhand des zeitdiskreten Streckenmodells	543
14.3.1 Entwurf einschleifiger Regelungen anhand des PN-Bildes des geschlossenen Kreises	543
14.3.2 Entwurf von Mehrgrößenreglern durch Polzuweisung	545
14.3.3 Zeitdiskrete optimale Regelung	546
14.3.4 Beobachter für zeitdiskrete Systeme	547
14.4 Regler mit endlicher Einstellzeit	548
14.5 MATLAB-Funktionen für den Entwurf digitaler Regler	557
Literaturhinweise	557
15 Ausblick auf weiterführende Regelungskonzepte	559
Literaturverzeichnis	561

Anhänge

Anhang 1: Lösung der Übungsaufgaben	567
Anhang 2: Matrizenrechnung	641
A2.1 Bezeichnungen und einfache Rechenregeln	641
A2.2 Eigenwerte und Eigenvektoren	643
A2.3 Singulärwertzerlegung	647
A2.4 Determinantensätze	648

A2.5 Normen von Vektoren und Matrizen	649
A2.6 Definitheit	650
A2.7 Lösung linearer Gleichungssysteme	651
A2.8 Nichtnegative Matrizen und M-Matrizen	652
Literaturhinweise	657
Anhang 3: MATLAB-Programme	659
A3.1 Funktionen für den Umgang mit Matrizen und Vektoren	659
A3.2 MATLAB-Funktionen für die Systemanalyse	660
A3.3 Funktionen für den Reglerentwurf	663
A3.4 Zusammenstellung der Programme	664
Anhang 4: Aufgaben zur Prüfungsvorbereitung	665
Anhang 5: Projektaufgaben	669
Anhang 6: Verzeichnis der wichtigsten Formelzeichen	681
Anhang 7: Korrespondenztabelle der Funktionaltransformationen	685
Anhang 8: Fachwörter deutsch – englisch	687
Sachwortverzeichnis	693

Verzeichnis der Anwendungsbeispiele

Regelung von Elektroenergieversorgungssystemen

• Frequenz-Übergabeleistungsregelung (FÜ-Regelung)

Kalmanzerlegung eines Elektroenergieversorgungsnetzes (Aufgabe 3.12)	117
Netzkennlinienverfahren für die FÜ-Regelung von Elektroenergienetzen (Aufgabe 5.1 mit Lösung)	226, 586
Dezentrale FÜ-Regelung (Beispiel 6.4)	281
Entwurf einer FÜ-Regelung als Optimalregler (Aufgabe 7.5 mit Lösung)	342, 604
Entwurf einer FÜ-Regelung mit dem Direkten Nyquistverfahren (Aufgabe 9.6 mit Lösung)	422, 618
Entwurf einer dezentralen FÜ-Regelung (Projektaufgabe A5.6 mit Lösung) . .	673, 635

• Knotenspannungsregelung

Spannungs-Blindleistungsverhalten eines Elektroenergienetzes (Aufgabe 2.4)	35
Entwurf einer dezentralen Knotenspannungsregelung (Beispiel 9.1)	392
Verbesserte Abschätzung für das Verhalten der dezentralen Knotenspannungsregelung (Beispiel 9.2)	405
Knotenspannungsregelung eines Elektroenergienetzes mit zwei Teilnetzen (Projektaufgabe A5.5)	673

• Dampferzeugerregelung

Verhalten eines Dampferzeugers (Beispiel 2.2)	40
Kalmanzerlegung eines Dampferzeugers (Aufgabe 3.13)	117
Minimale Realisierung eines Dampferzeugers (Aufgabe 3.20 mit Lösung)	146, 582
Optimalreglerentwurf für einen Dampferzeuger (Aufgabe 7.4 mit Lösung) . . .	342, 600
Regelung eines Dampferzeugers (Projektaufgabe A5.2)	671

Prozessregelung

Regelungsaufgabe für einen Wärmeübertrager (Beispiel 1.1)	4
Regelung einer Destillationskolonne (Beispiel 1.2)	5

• Regelung einer Anlage zur Herstellung von Ammoniumnitrat-Harnstoff-Lösung	
Einstellung der PI-Regelung für die AHL-Anlage (Beispiel 5.1)	237
Zeitdiskrete Realisierung des PI-Reglers (Aufgabe 14.2)	541
Analyse und Regelung der AHL-Anlage (Projektaufgabe A5.3)	671
• Analyse und Regelung von Rührkesselreaktoren	
Beschreibung eines Rührkesselreaktors in V-kanonischer Struktur (Beispiel 2.1)	28
Steuerbarkeit gekoppelter Rührkesselreaktoren (Beispiel 3.1)	70
Steuerbarkeit gekoppelter Rührkesselreaktoren mit zeitdiskreter Eingangsgröße (Beispiel 11.5)	479
Beobachtbarkeit gekoppelter Rührkesselreaktoren (Beispiel 3.7)	98
Beobachtbarkeit der Füllstände eines Behältersystems (Aufgabe 3.10)	108
Reduzierter Beobachter für zwei gekoppelte Rührkesselreaktoren (Aufgabe 8.4)	371
Konzentrationsregelung gekoppelter Rührkesselreaktoren durch Zustandsrückführung (Beispiel 6.1)	258
Stabilitätsanalyse der Konzentrationsregelung (Beispiel 4.1)	173
Konzentrationsregelung gekoppelter Rührkesselreaktoren durch Ausgangsrückführung (Beispiel 6.3)	276
Zustandsraummodell eines Mischprozesses (Aufgabe 2.1 mit Lösung)	17, 567
Analyse des Mischprozesses (Aufgabe 3.21 mit Lösung)	146, 583
Regelung eines Mischprozesses (Projektaufgabe A5.8)	676
• Regelung eines Biogasreaktors	
Regelungsaufgaben für einen Biogasreaktor (Beispiel 1.4)	6
Kopplungseigenschaften eines Biogasreaktors (Beispiel 4.6)	213
Existenz von PI-Reglern für einen Biogasreaktor (Beispiel 5.2)	246
Zeitdiskrete Messung der Betriebsgrößen (Aufgabe 10.1)	437
• Regelung einer Klärschlammverbrennungsanlage	
Auswahl der Stellgrößen für die Regelung einer Klärschlammverbrennungsanlage (Beispiel 4.5)	208
Einstellung der PI-Regelung für die Klärschlammverbrennungsanlage (Aufgabe 5.2)	243
Zeitdiskretes Modell der Klärschlammverbrennungsanlage (Aufgabe 11.6) ...	460
Analyse und Regelung einer Klärschlammverbrennungsanlage (Projektaufgabe A5.4)	672

Regelung von Fahrzeugen und Flugkörpern

Beobachtbarkeit der Satellitenbewegung (Aufgabe 3.8 mit Lösung)	106, 575
Flugüberwachung als zeitdiskreter Vorgang (Aufgabe 10.1)	437
Strukturelle Analyse eines Quadropters (Aufgabe 3.17)	140
Regelung eines Quadropters (Projektaufgabe A5.10)	678
• Abstandsregelung in Fahrzeugkolonnen	
Regelungsaufgabe (Beispiel 1.5)	8
Abstandsregelung in einer Fahrzeugkolonne (Beispiel 4.4)	198
Struktur der Abstandsregelung (Aufgabe 4.6)	201
Abstandsregelung mit unterschiedlichen Regelungsstrukturen (Projektaufgabe A5.9)	676
• Flugregelung	
Autopilot für ein Flugzeug (Beispiel 1.3)	6
Optimalregler für die Rollbewegung eines Flugzeugs (Beispiel 7.2)	319
Entwurf eines Reglers mit endlicher Einstellzeit für die Rollbewegung eines Flugzeugs (Aufgabe 14.4)	556
• Regelung einer Magnetschwebbahn	
Stabilitätsprüfung der geregelten Magnetschwebbahn (Beispiel 4.2)	174
Stabilisierung der Magnetschwebbahn durch Zustandsrückführung (Aufgabe 6.5 mit Lösung)	290, 596
Beobachter für die Magnetschwebbahn (Aufgabe 8.6 mit Lösung)	378, 607

Regelung mechanischer Systeme

Strukturelle Steuerbarkeit eines elektrischen Rotationsantriebs (Aufgabe 3.16 mit Lösung)	139, 579
• Analyse und Regelung einer Verladebrücke	
Steuerbarkeit und Beobachtbarkeit einer Verladebrücke (Aufgabe 3.9 mit Lösung)	107, 575
Steuerbarkeit einer Verladebrücke mit zeitdiskreter Eingangsgröße (Beispiel 11.7)	485
Regelung einer Verladebrücke mit Zustandsrückführung (Aufgabe 6.2 mit Lösung)	260, 592
Regelung einer Verladebrücke mit Ausgangsrückführung (Aufgabe 6.3 mit Lösung)	271, 595
Positionsregelung für eine Verladebrücke (Projektaufgabe A5.1)	670

• Stabilisierung eines invertierten Pendels

Kalmanzerlegung des Zustandsraummodells des invertierten Pendels (Beispiel 3.9)	111
Stabilisierung des invertierten Pendels durch Zustandsrückführung (Aufgabe 6.4)	289
LQ-Problem für das invertierte Pendel (Beispiel 7.1)	298
Stabilisierung des invertierten Pendels durch einen Optimalregler (Beispiel 7.3)	320
Beobachter für das invertierte Pendel (Beispiel 8.1)	360
Reduzierter Beobachter (Beispiel 8.2)	369

Regelung eines Gleichstrommotors

Beobachtbarkeit eines Gleichstrommotors (Aufgabe 3.14 mit Lösung)	130, 577
Störverhalten eines digital geregelten Gleichstrommotors (Beispiel 10.2)	432
Zeitdiskrete Realisierung einer Drehzahlregelung (Beispiel 14.1)	539
Regler mit endlicher Einstellzeit für einen Gleichstrommotor (Beispiel 14.3) ..	553

Weitere Anwendungen

Raumtemperaturregelung mit fester Einstellzeit (Aufgabe 14.3)	555
Regelung einer Züchtungsanlage für GaAs-Einkristalle (Aufgabe 9.5 mit Lösung)	420, 614
Analyse und Regelung der Einkristallzüchtungsanlage (Projektaufgabe A5.7) ..	675
Zeitdiskrete Zustandsraumbeschreibung einer Rinderzucht (Aufgabe 11.1 mit Lösung)	450, 623
Preisdynamik in der Landwirtschaft (Aufgabe 11.15 mit Lösung)	497, 630
Zeitdiskrete Zustandsraumbeschreibung der Lagerhaltung (Aufgabe 11.2)	450
Zustandsraummodell eines Filters (Beispiel 11.4)	468
Zustandsraummodell der Fußball-Bundesliga (Aufgabe 11.3)	451
Beobachtbarkeit eines Oszillators (Aufgabe 11.12 mit Lösung)	489, 628
Stabilitätsanalyse eines Bankkontos (Aufgabe 11.14)	496