

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	ix
Literatur-Empfehlungen	xi
Danksagung	xii
1 Grundlagen nichtlinearer Systeme	1
1.1 Systembeschreibungen und Systemverhalten	1
1.1.1 Lineare und nichtlineare Systeme	1
1.1.2 Systembeschreibungen und Regelkreiskategorien	3
1.1.3 Ruhelagen nichtlinearer Systeme	7
1.1.4 Beispiel Satellit	8
1.1.5 Ruhelagen linearer Systeme	11
1.1.6 Stabilität und asymptotische Stabilität von Ruhelagen	12
1.1.7 Exponentielle Stabilität von Ruhelagen	19
1.1.8 Stabilität von Systemen	20
1.1.9 Instabilität von Ruhelagen	22
1.1.10 Instabilität von Systemen	27
1.1.11 Stabilität bei variablem Eingangssignal	29
1.1.12 Grenzzyklen	32
1.1.13 Gleitzustände	34
1.1.14 Chaos	37
1.1.15 Zeitdiskrete Systeme	39
1.2 Lösung nichtlinearer Differenzialgleichungen	41
1.2.1 Existenz von Lösungen	41
1.2.2 Grundlegendes und das Verfahren von Euler-Cauchy	46
1.2.3 Genauigkeit der numerischen Lösung	48
1.2.4 Das verbesserte Euler-Cauchy-Verfahren	49

1.2.5	Die Verfahren von Heun und Simpson	50
1.2.6	Die Runge-Kutta-Verfahren	52
1.2.7	Adaption der Schrittweite	54
1.2.8	Mehrschrittverfahren von Adams-Bashforth	56
1.2.9	Prädiktor-Korrektor-Verfahren von Adams-Moulton	57
1.2.10	Stabilität von Integrationsverfahren	58
1.2.11	Steife Systeme und ihre Lösung	61
1.3	Aufgaben	63
2	Grenzyklen und Stabilitätskriterien	75
2.1	Verfahren der harmonischen Balance	75
2.1.1	Idee des Verfahrens	75
2.1.2	Illustrationsbeispiel	79
2.1.3	Kennlinien und ihre Beschreibungsfunktionen	81
2.1.4	Stabilitätsanalyse von Grenzyklen	88
2.1.5	Beispiel Servolenkssystem	91
2.2	Absolute Stabilität	95
2.2.1	Der Begriff der absoluten Stabilität	95
2.2.2	Das Popov-Kriterium und seine Anwendung	97
2.2.3	Die Vermutungen von Aiserman und Kalman	103
2.2.4	Beispiel Schiffsregelung	106
2.2.5	Das Kreiskriterium	109
2.2.6	Das Zypkin-Kriterium für zeitdiskrete Systeme	117
2.3	Die Stabilitätstheorie von Ljapunov	120
2.3.1	Die Idee und die direkte Methode	120
2.3.2	Illustrationsbeispiel	126
2.3.3	Quadratische Ljapunov-Funktionen	127
2.3.4	Beispiel Mutualismus	129
2.3.5	Die direkte Methode für zeitdiskrete Systeme	132
2.3.6	Die indirekte Methode	133
2.3.7	Der Nachweis exponentieller Stabilität	135
2.3.8	Beispiel Unterwassergleiter	137
2.3.9	Einzugsgebiete	142
2.3.10	Das Invarianzprinzip von LaSalle	146
2.3.11	Instabilitätskriterium	150
2.4	Passivität und Stabilität	152
2.4.1	Passive Systeme	152
2.4.2	Stabilität passiver Systeme	155
2.4.3	Passivität verbundener Systeme	157
2.4.4	Passivität linearer Systeme	160
2.4.5	Beispiel Transportsystem für Materialbahnen	164
2.4.6	Positiv reelle Übertragungsfunktionen	167
2.4.7	Äquivalenz von positiver Reellheit und Passivität	172
2.4.8	Verlustfreie Hamilton-Systeme	177
2.4.9	Beispiel Selbstbalancierendes Fahrzeug	184

2.4.10	Dissipative Hamilton-Systeme	188
2.4.11	Beispiel Fremderregte Gleichstrommaschine	191
2.4.12	Lineare Hamilton-Systeme	194
2.5	Aufgaben	202
3	Steuerbarkeit und Flachheit	215
3.1	Steuerbarkeit	215
3.1.1	Definition der Steuerbarkeit	215
3.1.2	Globale und lokale Steuerbarkeit	223
3.1.3	Nachweis der Steuerbarkeit	225
3.1.4	Beispiel Industrieroboter	229
3.1.5	Proxime Steuerbarkeit driftfreier Systeme	234
3.1.6	Beispiel Kraftfahrzeug mit Anhänger	241
3.1.7	Omnidirektionale Steuerbarkeit	244
3.1.8	Beispiel Dampferzeuger	247
3.2	Flachheit	250
3.2.1	Grundidee und Definition der Flachheit	250
3.2.2	Die Lie-Bäcklund-Transformation	254
3.2.3	Beispiel VTOL-Flugzeug	257
3.2.4	Flachheit und Steuerbarkeit	261
3.2.5	Flache Ausgänge linearer Systeme	262
3.2.6	Nachweis der Flachheit	265
3.3	Nichtlineare Zustandstransformationen	270
3.3.1	Transformation und transformierte Systemgleichung	270
3.3.2	Illustrationsbeispiel	274
3.3.3	Beispiel Park-Transformation	276
3.3.4	Bestimmung der Transformationsvorschrift	283
3.3.5	Veranschaulichung anhand linearer Systeme	284
3.4	Aufgaben	287
4	Regelungen für lineare Regelstrecken	295
4.1	Regler mit Antiwindup	295
4.1.1	Der Windup-Effekt	295
4.1.2	PID-Regler mit Antiwindup	297
4.1.3	Beispiel Gleichstrommotor	298
4.1.4	Antiwindup für allgemeine Reglerstrukturen	301
4.1.5	Dimensionierung des allgemeinen Antiwindup-Reglers	306
4.1.6	Stabilität	308
4.2	Zeitoptimale Regelung und Steuerung	309
4.2.1	Grundlagen und der Satz von Feldbaum	309
4.2.2	Berechnung zeitoptimaler Steuerfolgen	311
4.2.3	Beispiel $1/s^2$	313
4.2.4	Zeitoptimale Regler für Systeme niedriger Ordnung	317
4.2.5	Beispiel U-Boot	319
4.2.6	Zeitoptimale Vorsteuerung	322

4.3	Strukturvariable Regelungen ohne Gleitzustand	324
4.3.1	Grundlagen strukturvariabler Regelungen	324
4.3.2	Regler mit abschnittweise linearer Struktur	327
4.3.3	Beispiel Containerkran	332
4.4	Sättigungsregler	336
4.4.1	Funktionsweise und Stabilität	336
4.4.2	Entwurf in mehreren Schritten	341
4.4.3	Beispiel Helikopter	342
4.5	Aufgaben	345
5	Regelungen für nichtlineare Regelstrecken	355
5.1	Gain-scheduling-Regler	355
5.1.1	Funktionsweise und Entwurf	355
5.1.2	Illustrationsbeispiel	361
5.1.3	Beispiel Solarkraftwerk mit Parabolrinnenkollektor	363
5.2	Reglerentwurf mittels exakter Linearisierung	369
5.2.1	Grundidee und nichtlineare Regelungsnormalform	369
5.2.2	Nichtlinearer Regler und linearer Regelkreis	374
5.2.3	Beispiel Magnetlager	377
5.2.4	Regelstrecken mit interner Dynamik	381
5.2.5	Entwurfsverfahren	388
5.2.6	Beispiel Mondlandefähre	389
5.2.7	Exakte Linearisierung allgemeiner Systeme	394
5.2.8	Relativer Grad und interne Dynamik linearer Systeme .	398
5.2.9	Regelgesetz im linearen Fall	405
5.2.10	Stabilität von interner Dynamik und Nulldynamik	408
5.2.11	Exakte Linearisierung von MIMO-Systemen	411
5.2.12	Der MIMO-Regelkreis in Zustandsraumdarstellung	415
5.2.13	Beispiel Verbrennungsmotor	420
5.3	Exakte Zustandslinearisierung	423
5.3.1	Exakte Zustandslinearisierung von SISO-Systemen	423
5.3.2	Beispiel Bohrturm	429
5.3.3	Exakte Zustandslinearisierung von MIMO-Systemen ...	435
5.3.4	Flachheit exakt zustandslinearisierbarer Systeme	439
5.3.5	Beispiel Rakete	441
5.4	Steuerung und Regelung flacher Systeme	445
5.4.1	Grundlagen	445
5.4.2	Steuerung von Systemen mit fiktivem flachen Ausgang .	447
5.4.3	Flachheitsbasierte Steuerung linearer Systeme	451
5.4.4	Beispiel Triebwerksbasierte Flugzeugsteuerung	453
5.4.5	Flachheitsbasierte Regelung nichtlinearer Systeme	458
5.4.6	Beispiel Pneumatikmotor	463
5.4.7	Flache Eingänge und ihre Konstruktion	467
5.4.8	Flache Eingänge linearer Systeme	472
5.4.9	Beispiel Ökonomisches Marktmodell	472

5.5	Control-Ljapunov-Funktionen	475
5.5.1	Grundlagen	475
5.5.2	Control-Ljapunov-Funktion für lineare Systeme	477
5.5.3	Regler für eingangslinare Systeme	478
5.5.4	Illustrationsbeispiel	480
5.5.5	Beispiel Kraftwerk mit Netzeinspeisung	482
5.6	Das Backstepping-Verfahren	487
5.6.1	Idee des Verfahrens	487
5.6.2	Rekursives Schema für den Reglerentwurf	493
5.6.3	Illustrationsbeispiele	495
5.6.4	Beispiel Fluidsystem mit chaotischem Verhalten	498
5.7	Aufgaben	503
6	Regelungen für lineare und nichtlineare Regelstrecken	515
6.1	Modellbasierte prädiktive Regelung	515
6.1.1	Grundlagen und Funktionsweise	515
6.1.2	Lineare modellbasierte prädiktive Regelung	519
6.1.3	LMPR mit Beschränkungen	524
6.1.4	Beispiel Entwässerungssystem	527
6.1.5	Nichtlineare modellbasierte prädiktive Regelung	531
6.1.6	Beispiel Eindampfanlage	537
6.2	Strukturvariable Regelungen mit Gleitzustand	541
6.2.1	Funktionsweise und Eigenschaften	541
6.2.2	Entwurf für lineare Regelstrecken	543
6.2.3	Dynamik im Gleitzustand	545
6.2.4	Nachweis der Robustheit	547
6.2.5	Beispiel DC-DC-Wandler	547
6.2.6	Entwurf für nichtlineare Regelstrecken	553
6.2.7	Beispiel Optischer Schalter	555
6.3	Passivitätsbasierte Regelung	558
6.3.1	Regelung passiver Systeme mittels Kennfeldern	558
6.3.2	Beispiel Dämpfung seismischer Gebäudeschwingungen ..	561
6.3.3	Passivierung nichtpassiver linearer Systeme	569
6.3.4	Passivierung nichtpassiver eingangslinerer Systeme....	574
6.3.5	Passivitätsbasierte Regelung mit IDA	576
6.3.6	Beispiel Papiermaschine	581
6.4	Fuzzy-Control	585
6.4.1	Einführung	585
6.4.2	Fuzzifizierung	587
6.4.3	Inferenz	589
6.4.4	Defuzzifizierung	596
6.4.5	Fuzzy-Systeme und Fuzzy-Regler	598
6.4.6	Beispiel Abstandsregelung für Automobile	600
6.5	Aufgaben	606

7	Beobachter für nichtlineare Systeme	615
7.1	Beobachtbarkeit nichtlinearer Systeme	615
7.1.1	Definition der Beobachtbarkeit	615
7.1.2	Beobachtbarkeit autonomer Systeme	620
7.1.3	Beispiel Synchrongenerator	623
7.1.4	Beobachtbarkeit allgemeiner nichtlinearer Systeme	624
7.1.5	Nichtlineare Beobachtbarkeitsnormalform	627
7.1.6	Beobachtbarkeit eingangslinärer Systeme	630
7.2	Normalformen und der Normalformbeobachter	633
7.3	Luenberger-Beobachter für nichtlineare Regelkreise	637
7.4	Beobachterentwurf mittels Linearisierung	640
7.4.1	Funktionsweise und Entwurf	640
7.4.2	Regelkreis mit Beobachter	644
7.4.3	Beispiel Bioreaktor	645
7.5	Das erweiterte Kalman-Filter	650
7.5.1	Kalman-Filter für lineare Systeme	650
7.5.2	Das EKF für nichtlineare Systeme	651
7.5.3	Beispiel Flugzeugtriebwerk	654
7.6	High-gain-Beobachter	658
7.6.1	Einführung und Funktionsweise	658
7.6.2	High-gain-Beobachter in allgemeiner Form	663
7.6.3	Beispiel Chemischer Reaktor	666
7.6.4	Der Fall eingangslinärer Systeme	669
7.7	Aufgaben	673
8	Lösungen der Aufgaben	679
A	Beweise und zusätzliche Informationen	711
A.1	Hysteresemodell	711
A.2	Beweis des Satzes 11	713
A.3	Beweis des Satzes 12	717
A.4	Beweis des Satzes 95	718
A.5	Daten zum Beispiel Containerkran	720
B	Mathematische Zeichen und Funktionen	723
	Literaturverzeichnis	729
	Sachverzeichnis	757