

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b>	<b>V</b>
<b>1 Nichtlineare Regelungssysteme</b>	<b>1</b>
1.1 Einführung	1
1.2 Der Regelkreis und seine Komponenten	3
1.3 Beispiele nichtlinearer technischer Systeme	8
1.4 Klassen nichtlinearer Systeme	20
1.5 Lineare und nichtlineare Systemtheorie	22
<b>2 Übertragungsmodelle nichtlinearer zeitkontinuierlicher Systeme</b>	<b>25</b>
2.1 Klemmen- und Zustandsmodelle	25
2.2 Lineare Systeme	27
2.3 Voltterrareihen für nichtlineare Systeme	30
2.4 Voltterrakerne im Transformationsbereich	33
2.5 Zusammengesetzte Systeme im Zeitbereich	37
2.6 Zusammengesetzte Systeme im Bildbereich	42
<b>3 Zeitkontinuierliche bilineare Systeme</b>	<b>48</b>
3.1 Das Zustandsmodell der BLS	48
3.2 Lösungen der Zustandsgleichungen	51
3.3 Die Voltterrareihendarstellung der BLS	60
3.4 Markovparameterdarstellung	62
3.5 Homogene BLS	66
3.6 Realisierungen von homogenen BLS	69
3.7 Erreichbarkeit und Beobachtbarkeit	79
3.8 Stabilität, Erreichbarkeit und Beobachtbarkeit homogener BLS	87
3.9 Zustandsraumzerlegung und das Hautus-Kriterium	91
3.10 Normalformen für Zustandsmodelle	96
3.11 Realisierungstheorie	106
3.12 BLS-Realisierung aus Markovparametern	110
3.13 BLS - Realisierungen in Normalform	112
3.14 Singulärwertzerlegung und Ordnungsreduktion	115
<b>4 Zeitdiskrete bilineare Systeme</b>	<b>119</b>
4.1 Einleitung	119
4.2 Zustandsmodelle im Zeitbereich	120
4.3 Lösung der Zustandsgleichungen	124
4.4 Erreichbarkeit und Beobachtbarkeit	127
4.5 Übertragungsmodelle im Zeitbereich	129
4.6 Übertragungsmodelle im Transformationsbereich	131
4.7 Realisierung zeitdiskreter BLS	135
4.8 Realisierungsalgorithmus für homogene Systeme	139
4.9 Markovparameter und Realisierung linearer Systeme	142
4.10 Markovparameterdarstellung zeitdiskreter BLS	145
4.11 Systemidentifikation zeitdiskreter LS	149
4.12 Identifikation kontinuierlicher LS	150

4.13	Systemidentifikation zeitdiskreter BLS	154
4.14	Identifikation kontinuierlicher BLS	160
4.15	Stabilität abgetasteter Polynom-BLS	164
<b>5</b>	<b>Näherungen für nichtlineare Systeme</b>	<b>170</b>
5.1	Linearisierung	170
5.2	Carleman-Linearisierung	173
5.3	Beispiel zur Carleman-Linearisierung	178
5.4	Bilinearisierung mittels linearer Modelle	189
5.5	Bilinearisierung durch Parameterschätzung	191
5.6	Bilinearisierung mittels Realisierungstheorie	196
<b>6</b>	<b>Regler- und Beobachterentwurf für BLS</b>	<b>199</b>
6.1	Einführung	199
6.2	Stabilitätseigenschaften der BLS	199
6.3	Stabilisierbarkeit von BLS	203
6.4	Quadratische Zustandsrückführung	207
6.5	Einwirkung von Störsignalen	211
6.6	Verarbeitung von Führungssignalen	214
6.7	Modellfolgeregelung für BLS	219
6.8	Identitätsbeobachter	224
6.9	Zweistufiger linearer Beobachter	231
6.10	Störgrößenbeobachter	239
<b>7</b>	<b>Zustandsmodelle für ALS</b>	<b>243</b>
7.1	Problemstellung	243
7.2	Distribution	244
7.3	Koordinatentransformationen	249
7.4	Lokale Zerlegung des Zustandsraumes eines ALS	253
7.5	Erreichbarkeit	259
7.6	Rang-Erreichbarkeitskriterium	262
7.7	Beobachtbarkeit	269
7.8	Kanonische Formen	274
7.9	Realisierungstheorie	283
7.10	Stabilität	288
<b>8</b>	<b>Differenzengrad und Nulldynamik der ALS</b>	<b>295</b>
8.1	Einleitung	295
8.2	Differenzengrad linearer Eingrößensysteme	296
8.3	Differenzengrad für ALS	303
8.4	Bilineare Systeme	305
8.5	Nulldynamik nichtlinearer Systeme	309
8.6	Normalform für ALS	313
8.7	Linearisierung durch Zustandsrückführung	320
8.8	Lokale Stabilisierung	324
8.9	Das Folgeregelungsproblem	328
8.10	Störsignalentkopplung	334
8.11	Beobachter mit linearer Fehlerdynamik	336

<b>9</b>	<b>Entkopplung und Linearisierung von Mehrgrößen-ALS</b>	<b>342</b>
9.1	Pole und Nullstellen eines Mehrgrößen-LS	342
9.2	Differenzengrad und Nullstellen eines LS	348
9.3	Entkopplung des linearen Mehrgrößensystems	354
9.4	Differenzengrad der Mehrgrößen-ALS	359
9.5	Koordinatentransformation und Normalform	362
9.6	Nullodynamik	368
9.7	Exakte Linearisierung durch Zustandsrückführung	372
9.8	Entkopplung und Zustandsrückführung	378
9.9	Entkopplung von BLS	384
<b>10</b>	<b>Zeitdiskrete Analytisch-Lineare Systeme</b>	<b>393</b>
10.1	Problemstellung	393
10.2	Differenzengrad linearer Eingrößensysteme	394
10.3	Lineare Mehrgrößensysteme	400
10.4	Entkopplung durch Zustandsrückführung	408
10.5	Differenzengrad zeitdiskreter Eingrößen-ALS	411
10.6	Normalform für zeitdiskrete BLS	416
10.7	Exakte Linearisierung von Eingrößen-BLS	420
10.8	Normalform für zeitdiskrete Mehrgrößen-BLS	422
10.9	Ausgangsnullung und Entkopplung zeitdiskreter BLS	426
10.10	Differenzengrad und Normalform zeitdiskreter ALS	432
10.11	Lineare Abtastsysteme	436
10.12	Bilineare und analytische Systeme	439
<b>11</b>	<b>Stochastisch erregte nichtlineare Systeme</b>	<b>442</b>
11.1	Einleitung	442
11.2	Grundbegriffe der mathematischen Statistik	443
11.3	Stochastische Prozesse	450
11.4	Systemantworten linearer zeitinvarianter Systeme	458
11.5	Zeitliche Mittelwerte bei Volterra-Systemen	463
11.6	Auto- und Kreuzkorrelationsfunktionen	468
11.7	Spektralfunktionen	471
11.8	Messungen an homogenen Systemen	474
11.9	Die Orthogonalentwicklung von Wiener	477
11.10	Bestimmung der Wiener-Kerne durch Messung	485
11.11	Systemidentifikation mit weißen Rauschsignalen	492
11.12	Identifikation für farbige Eingangssignale	497
<b>12</b>	<b>Zeitdiskrete Systeme und Rauschsignale</b>	<b>504</b>
12.1	Zeitdiskrete stochastische Prozesse	504
12.2	Kenngrößen zeitdiskreter Rauschsignale	508
12.3	Abgetastete zeitkontinuierliche Rauschsignale	512
12.4	Systemantworten linearer Systeme	516
12.5	Zeitbereichsantworten von Volterra-Systemen	523
12.6	Spektralfunktionen	532
12.7	Kreuzkorrelationsmessung homogener Systeme	534
12.8	Die Orthogonalentwicklung von Wiener	536

12.9 Bestimmung der Wiener-Kerne durch Messung . . . . .	542
12.10 Optimale Identifikation für weiße Eingangssignale . . . . .	549
12.11 Identifikation für farbige Eingangssignale . . . . .	554
<b>Anhang</b>	<b>561</b>
A Formelzeichen und Bezeichnungen . . . . .	561
B Vektoren und Matrizen . . . . .	564
C Ableitungen von Vektoren, Vektorfunktionen und Vektorfeldern .	570
<b>Literatur</b>	<b>574</b>
<b>Stichwortverzeichnis</b>	<b>581</b>