

Inhalt

1	Einführung	1
1.1	Dynamische Systeme und ihre Modelle	1
1.2	Wege der Modellbildung	5
1.3	Beschreibungsformen für die unterschiedlichen Modelltypen	6
1.4	Vorgehensweise bei der Systemidentifikation	8
2	Identifikation linearer Systeme anhand nichtparametrischer Modelle im Zeit- und Frequenzbereich	13
2.1	Einführung	13
2.2	Verfahren im Zeitbereich	15
2.2.1	Messung und Auswertung der Übergangsfunktion	15
2.2.2	Bestimmung der Übergangsfunktion aus der Antwort auf einfache Testsignale	18
2.2.3	Bestimmung der Gewichtsfunktion durch numerische Entfaltung	19
2.2.4	Systemidentifikation mittels Korrelationsanalyse	21
2.2.4.1	Ermittlung der Gewichtsfunktion	21
2.2.4.2	Korrelationsanalyse mittels binärer und ternärer Rauschsignale	23
2.2.4.3	Korrelationsanalyse im geschlossenen Regelkreis	36
2.2.4.4	Direkte Bestimmung des Frequenzgangs durch Korrelationsanalyse	38
2.2.5	Systemidentifikation anhand der vorgegebenen Gewichtsfunktion	39
2.3	Verfahren im Frequenzbereich	41
2.3.1	Messung des Frequenzgangs und Approximation durch rationale Funktionen	41
2.3.2	Zusammenhänge zwischen Zeit- und Frequenzbereichsdarstellungen	45
2.3.2.1	Berechnung des Frequenzgangs aus der Sprungantwort	46
2.3.2.2	Berechnung des Frequenzgangs aus der Antwort auf nicht-sprungförmige deterministische Testsignale	48
2.3.3	Berechnung der Übergangsfunktion aus dem Frequenzgang	52

3 Identifikation linearer Eingrößensysteme mittels Parameterschätzverfahren	55
3.1 Problemstellung	55
3.2 Modellstruktur	59
3.3 Lösung des Schätzproblems	67
3.3.1 Direkte Lösung (<i>Least-Squares</i> -Verfahren)	67
3.3.2 Rekursive Lösung (RLS-Verfahren)	75
3.3.3 Hilfsvariablen-Verfahren	79
3.3.4 <i>Maximum-Likelihood</i> -Verfahren	82
3.4 Verbesserte rekursive Parameterschätzverfahren	91
3.4.1 Probleme	91
3.4.2 Verbesserte rekursive <i>Least-Squares</i> -Verfahren	95
3.4.2.1 Gewichtetes rekursives Least-Squares-Verfahren	95
3.4.2.2 Weitere Maßnahmen	102
3.4.2.3 Schätzung eines Gleichanteils im Ausgangssignal	104
3.4.2.4 Wahl der Startparameter	106
3.4.3 Rekursives gewichtetes Hilfsvariablen-Verfahren	107
3.4.4 Methode der stochastischen Approximation	108
3.5 Prädiktionsfehler-Verfahren	111
3.5.1 Direkte (nicht rekursive) Lösung	111
3.5.2 Rekursive Schätzung	113
3.5.3 Prädiktor für das ARMAX-Modell	115
3.5.4 Kalman-Filter als Prädiktor	117
3.6 Identifikation zeitvarianter Parameter	120
3.7 Identifikation im Frequenzbereich	125
3.8 Parameterschätzung von Eingrößensystemen im geschlossenen Regelkreis .	127
3.8.1 Indirekte Identifikation	127
3.8.2 Direkte Identifikation	129
3.8.3 Gemeinsame Eingangs-Ausgangs-Identifikation	130
3.8.4 Identifizierbarkeit	132
3.8.5 <i>Self-Tuning</i> -Regler	137

4	Strukturprüfung für lineare Eingrößensysteme	141
4.1	Formulierung des Problems	141
4.2	Verfahren zur <i>A-priori</i> -Ermittlung der Ordnung	142
4.2.1	Determinantenverhältnis-Test	142
4.2.2	Erweiterter Determinantenverhältnis-Test	143
4.2.3	Instrumenteller Determinantenverhältnis-Test	143
4.3	Verfahren zur Bewertung der Ausgangssignalschätzung	144
4.3.1	Signalfehlerstest	144
4.3.2	Fehlerfunktionstest	145
4.3.3	F-Test	145
4.3.4	Informationskriterien	147
4.4	Verfahren zur Beurteilung der geschätzten Übertragungsfunktion	148
4.4.1	Polynom-Test	149
4.4.2	Kombinierter Polynom- und Dominanz-Test	149
4.5	Vergleich der Verfahren	150
5	Identifikation linearer Mehrgrößensysteme mittels Parameterschätz- verfahren	157
5.1	Einführung	157
5.2	Modellansätze mittels Übertragungsfunktionen und Übertragungsmatrizen	157
5.2.1	Gesamtmodellansatz	158
5.2.2	Teilmodellansatz	160
5.2.3	Einzelmodellansatz	162
5.3	Algorithmen zur Parameterschätzung von linearen Mehrgrößensystemen .	164
5.3.1	Parameterschätzung bei Verwendung des Teilmodellansatzes	166
5.3.2	Parameterschätzung bei Verwendung des Einzelmodellansatzes . .	167
5.4	Modellansatz mittels Polynommatrizen	168
5.4.1	Schätzgleichung zur Parameterbestimmung	169
5.4.2	Numerische Lösung des Schätzproblems	174
5.4.2.1	Direkte Lösung	174
5.4.2.2	Rekursive Lösung	174
5.4.3	Strukturprüfung	175

5.5	Modellansatz mittels Zustandsraumdarstellung	176
5.5.1	Zusammenhang zwischen Zustandsraumdarstellung und Eingangs- Ausgangs-Beschreibung	176
5.5.2	Ho-Kalman-Realisierungsalgorithmus	178
5.5.3	<i>Subspace</i> -Identifikation	181
5.5.4	Praktische Gesichtspunkte	187
6	Identifikation unter Verwendung zeitkontinuierlicher Modelle	189
6.1	Problemstellung	189
6.2	Verfahren zur Behandlung der zeitlichen Ableitungen der Eingangs- Ausgangs-Signale	190
6.2.1	Verfahren mit Modulationsfunktionen	190
6.2.1.1	Grundgedanke des Verfahrens	190
6.2.1.2	Hartley-Modulationsfunktion	192
6.2.2	Linearfilter-Verfahren	199
6.2.2.1	Grundgedanke des Verfahrens	199
6.2.2.2	Reduktion der Anzahl der Filterpaare	201
6.2.2.3	Lösung mittels des Least-Squares-Verfahrens	202
6.2.3	Integrations-Verfahren	202
6.2.3.1	Poisson-Momentenfunktional-Verfahren	202
6.2.3.2	Methode der orthogonalen Funktionen	205
6.3	Verfahren mit selbstanpassendem Modell	207
6.3.1	Einführendes Beispiel	207
6.3.2	Gradienten-Verfahren mit Parallel-Modell	209
6.4	Anwendung der δ -Transformation zur Identifikation linearer zeitkontinu- ierlicher Systeme	212
6.4.1	δ -Transformation	212
6.4.1.1	Definitionen	212
6.4.1.2	δ -Übertragungsfunktion	214
6.4.1.3	Lösung einer gewöhnlichen Differentialgleichung mittels der δ -Transformation	218
6.4.1.4	Abbildungseigenschaften der δ -Transformation	219
6.4.2	Realisierung der δ -Operation	221

6.4.2.1	Bildung der Differenzenquotienten im δ -Bereich	221
6.4.2.2	Realisierung der δ^{-1} -Operation	223
6.4.3	Identifikation zeitkontinuierlicher Systeme im δ -Bereich	223
6.4.3.1	ARX-Modellansatz im δ -Bereich	223
6.4.3.2	ARMAX-Modellansatz im δ -Bereich	225
6.4.3.3	Vorteile der Identifikation mittels der δ -Transformation	226
7	Modelle für nichtlineare dynamische Systeme	229
7.1	Einführung	229
7.2	Übersicht und Einteilung dynamischer Modelle	234
7.2.1	Grundlegende Einteilungskriterien	234
7.2.2	Eingangs-Ausgangs-Beschreibung und Zustandsraumbeschreibung	237
7.2.3	Zeitkontinuierliche und zeitdiskrete Modelle	240
7.2.4	<i>Black-Box</i> -, <i>Gray-Box</i> - und <i>White-Box</i> -Modelle	242
7.2.5	Parametrische und nichtparametrische Modelle	243
7.2.6	Linear und nichtlinear parameterabhängige Modelle	245
7.2.7	Berücksichtigung von Störungen	250
7.3	Eingangs-Ausgangs-Modelle	256
7.3.1	Volterra-Reihe	256
7.3.1.1	Komprimierte Volterra-Reihe	271
7.3.1.2	Homogene Systeme und Polynomsysteme	274
7.3.1.3	Einsatz der Volterra-Reihe in der Systemidentifikation	276
7.3.2	Wiener-Reihe	277
7.3.2.1	Einsatz der Wiener-Reihe in der Systemidentifikation	279
7.3.3	Differentialgleichungen und Modulationsfunktionsmodelle	280
7.3.4	Differenzgleichungen und NARMAX-Modelle	290
7.3.5	Kolmogorov-Gabor-Polynom	293
7.3.6	Bilineares zeitdiskretes Eingangs-Ausgangs-Modell	299
7.3.7	Blockorientierte Modelle	300
7.3.7.1	Hammerstein-Modell	302
7.3.7.2	Wiener-Modell	305
7.3.7.3	Lur'e-Modell	306

7.3.7.4	Weitere blockorientierte Modelle	309
7.3.7.5	Einsatz blockorientierter Modelle zur Systemidentifikation	309
7.3.8	Künstliche neuronale Netze	309
7.3.8.1	Aufbau eines Neurons	311
7.3.8.2	Einfaches Perzeptron	313
7.3.8.3	RBF-Neuronen und RBF-Netze	315
7.3.8.4	Aufbau eines neuronalen Netzes	318
7.3.8.5	Verwendung künstlicher neuronaler Netze zur Beschreibung dynamischer Systeme	320
7.3.8.6	Systemidentifikation mit künstlichen neuronalen Netzen	320
7.3.9	Fuzzy-Modelle	321
7.3.9.1	Fuzzy-Mengen und Zugehörigkeitsfunktionen	321
7.3.9.2	Linguistische Variable und Fuzzifizierung	324
7.3.9.3	Fuzzy-Regelbasis	325
7.3.9.4	Fuzzy-Logik-Operatoren	328
7.3.9.5	Fuzzy-Inferenz	329
7.3.9.6	Defuzzifizierung	333
7.3.9.7	Aufbau eines regelbasierten Fuzzy-Systems	336
7.3.9.8	Fuzzy-Modelle zur Beschreibung dynamischer Systeme	338
7.3.9.9	Systemidentifikation mit Fuzzy-Modellen	338
7.4	Zustandsraummodelle	339
7.4.1	Steuerungslineares Modell	342
7.4.2	Zustandslineares Modell	343
7.4.3	Bilineares Zustandsraummodell	344
7.4.4	Blockorientierte Modelle	344
7.4.4.1	Hammerstein-Modell	345
7.4.4.2	Wiener-Modell	346
7.4.4.3	Hammerstein-Wiener-Modell	346
7.4.4.4	Wiener-Hammerstein-Modell	347
7.4.4.5	Lur'e-Modell	348
7.4.4.6	Weitere blockorientierte Modelle	349

8 Verfahren zur Identifikation nichtlinearer Systeme	351
8.1 Einführung	351
8.2 Überblick und Einteilung der Verfahren	352
8.2.1 Probabilistische Schätzverfahren	359
8.2.1.1 Bayes-Schätzung	359
8.2.1.2 <i>Maximum-a-posteriori</i> -Schätzung	361
8.2.1.3 <i>Maximum-Likelihood</i> -Schätzung	362
8.2.2 Modellanpassungsverfahren	362
8.2.2.1 <i>Least-Squares</i> -Schätzung	364
8.2.2.2 <i>Least-Squares</i> -Schätzung bei linearer Parameterabhängigkeit	366
8.2.2.3 Verallgemeinerte und gewichtete <i>Least-Squares</i> -Schätzung	367
8.2.2.4 Verallgemeinerte <i>Least-Squares</i> -Schätzung bei linearer Parameterabhängigkeit	370
8.2.2.5 Markov-Schätzung	371
8.2.3 Prädiktionsfehler-Verfahren	372
8.2.4 Rekursive Parameterschätzung	372
8.2.4.1 Rekursiver Gauß-Newton-Algorithmus für ein <i>Least-Squares</i> -Gütefunktional	373
8.2.4.2 Rekursiver Gauß-Newton-Algorithmus für ein <i>Maximum-Likelihood</i> -Gütefunktional	377
8.2.5 Gradientenberechnung und Empfindlichkeitsmodelle	379
8.3 Explizite Verfahren	385
8.3.1 Einführung	385
8.3.2 Bestimmung von Kernen für zeitkontinuierliche Volterra- und Wiener-Reihen	386
8.3.3 Direkte <i>Least-Squares</i> -Schätzung bei affin parameterabhängigem Modellfehler	396
8.3.3.1 Affin parameterabhängige Fehlergleichung	396
8.3.3.2 Kolmogorov-Gabor-Polynom	403
8.3.3.3 Endliche zeitdiskrete Volterra-Reihe	403
8.3.3.4 Bilineares zeitdiskretes Eingangs-Ausgangs-Modell	405
8.3.3.5 Modulationsfunktionsmodelle	405

8.3.3.6	Lösung des Schätzproblems	408
8.3.3.7	Systematischer Fehler bei der <i>Least-Squares</i> -Schätzung .	410
8.4	Implizite Verfahren	421
8.4.1	Einführung	421
8.4.2	Rekursive <i>Least-Squares</i> -Schätzung bei linear parameter- abhängigen Eingangs-Ausgangs-Modellen	421
8.4.3	Backpropagationsverfahren für Parameterschätzung bei künstlichen neuronalen Multi-Layer-Perzeptron-Netzen	425
8.4.3.1	Backpropagationsverfahren	425
8.4.3.2	Backpropagationsverfahren mit Levenberg-Marquardt- Algorithmus	434
8.4.3.3	Anwendung zur Identifikation dynamischer Systeme . . .	439
8.4.4	Parameterschätzung für Zustandsraummodelle über Zustands- erweiterung und nichtlineare Filterung	445
8.4.4.1	Nichtlineare Filter zur Zustandsschätzung	448
8.4.5	Parameterschätzung für Zustandsraummodelle über adaptive nicht- lineare Filter	454
8.5	Strukturprüfung nichtlinearer Systeme	460
8.5.1	Zerlegung des Ausgangs eines Polynomsystems in Anteile verschie- dener Grade	466
8.5.2	Prüfung auf Hammerstein- und Wiener-Struktur anhand von Sprungantworten	471
8.5.3	Strukturprüfung blockorientierter Modelle anhand geschätzter Kerne	471
8.5.4	Strukturprüfung blockorientierter Modelle anhand äquivalenter Frequenzantworten	476
8.5.5	Strukturprüfung von blockorientierten Modellen zweiter Ordnung .	478
8.5.6	Strukturprüfung für ein Modell mit einer statischen Nichtlinearität anhand von Frequenzantworten	478
8.5.7	Strukturprüfung durch Auswahl signifikanter Regressoren bei linear parameterabhängigen Modellen	481
8.5.7.1	Direkte Verwendung der Summe der quadrierten Residuen	483
8.5.7.2	Kriterien mit Berücksichtigung der Anzahl der Regressoren	484
8.5.7.3	Modellvergleich über den F-Test	487

8.5.7.4	Ermittlung der Signifikanz der geschätzten Parameter über den t-Test	488
8.5.7.5	Strukturprüfung über vollständige Suche	489
8.5.7.6	Strukturprüfung über Vorwärts- und Rückwärtsregression	489
8.5.7.7	Strukturprüfung über schrittweise Regression	490
8.5.7.8	Orthogonale Regression	491
8.5.8	Strukturprüfung bei Parameterschätzung über <i>Maximum-Likelihood</i> -oder Prädiktionsfehler-Verfahren	493
9	Praktische Aspekte der Identifikation	495
9.1	Einführung und Überblick	495
9.2	Randbedingungen der Identifikationsaufgabe	496
9.3	Theoretische Betrachtungen	499
9.4	Voruntersuchungen durch Simulationsstudien	500
9.5	Experimenteller Aufbau und Voruntersuchungen	502
9.6	Festlegung der Abtastzeit	503
9.7	Festlegung der Messdauer	508
9.8	Wahl und Erzeugung des Eingangssignals	509
9.8.1	Periodische Signale	510
9.8.1.1	Zeitkontinuierliche periodische Signale	510
9.8.1.2	Abgetastete periodische Signale in zeitkontinuierlicher Darstellung	513
9.8.1.3	Abgetastete periodische Signale in zeitdiskreter Darstellung	516
9.8.1.4	Berechnung der Fourier-Reihenoeffizienten aus abgetasteten Werten	520
9.8.1.5	Stufenförmige periodische Signale	526
9.8.2	Verwendung periodischer Signale in der Identifikation	528
9.8.3	Spezielle periodische Signale	530
9.8.3.1	Monofrequente Sinussignale	530
9.8.3.2	Multisinus-Signale	531
9.8.3.3	Periodisch fortgesetzter Gleitsinus	534
9.8.3.4	Periodisch fortgesetztes Rauschen	540
9.8.3.5	<i>Pseudo-Random-Multilevel-Sequence</i> -Signale	542

9.8.4	Nichtperiodische Signale	544
9.9	Durchführung der Messungen	551
9.10	Sichtung und Bearbeitung der Messdaten	551
9.11	Wahl einer Modellstruktur	554
9.12	Durchführen der Identifikation	555
9.13	Bewertung und Dokumentation des Ergebnisses	556
A	Grundlagen der statistischen Behandlung linearer Systeme	559
A.1	Grundbegriffe der Wahrscheinlichkeitsrechnung	559
A.1.1	Relative Häufigkeit und Wahrscheinlichkeit	559
A.1.2	Verteilungsfunktion und Dichtefunktion	561
A.1.3	Mittelwerte und Momente	564
A.1.4	Gauß-Verteilung	566
A.2	Stochastische Prozesse	567
A.2.1	Beschreibung stochastischer Prozesse	567
A.2.2	Stationäre stochastische Prozesse	569
A.3	Korrelationsfunktionen und ihre Eigenschaften	571
A.3.1	Korrelationsfaktor	571
A.3.2	Autokorrelations- und Kreuzkorrelationsfunktion	572
A.3.3	Eigenschaften von Korrelationsfunktionen	574
A.3.4	Bestimmung der Autokorrelationsfunktion	577
A.4	Spektrale Leistungsdichte	578
A.4.1	Definition der spektralen Leistungsdichte	578
A.4.2	Beispiele für spektrale Leistungsdichten	579
A.5	Statistische Eigenschaften der Parameterschätzung	582
A.5.1	Erwartungstreue Schätzung	582
A.5.2	Konsistente Schätzung	583
A.5.3	Wirksame Schätzung	583
A.5.4	Erschöpfende Schätzung	583
A.5.5	Cramer-Rao-Grenze	584

B Statistische Bestimmung dynamischer Eigenschaften linearer Systeme	585
B.1 Grundlegende Zusammenhänge	585
B.2 Auflösung der Grundgleichung	587
B.2.1 Auflösung im Frequenzbereich	587
B.2.2 Numerische Lösung im Zeitbereich	589
B.3 Zusammenhang zwischen den spektralen Leistungsdichten am Eingang und Ausgang linearer Systeme	590
C Fourier-Transformation	595
C.1 Zweiseitige Laplace-Transformation	595
C.2 Fourier-Transformation	595
C.3 Eigenschaften der Fourier-Transformation	598
C.4 Parsevalsche Formel	601
D Herleitung gewichteter rekursiver Parameterschätzverfahren	603
D.1 Gewichtetes rekursives <i>Least-Squares</i> -Verfahren	603
D.2 Gewichtetes rekursives Hilfsvariablen-Verfahren	604
E Kanonische Beobachtbarkeitsnormalform eines Mehrgrößensystems	605
F Hartley-Transformation	613
F.1 Hartley-Reihenentwicklung	613
F.2 Zeitkontinuierliche Hartley-Transformation	613
F.3 Diskrete Hartley-Transformation	616
G Matrixdifferentialrechnung	619
G.1 Ableitung einer Matrix	619
G.2 Matrixproduktregel	620
G.3 Matrixkettenregel	621
G.4 Kroneckerproduktregel	621
G.5 Ableitung der Kroneckersumme	621
G.6 Matrix-Taylor-Entwicklung	621
G.7 Ableitung der Inversen	622
G.8 Ableitung des Logarithmus der Determinante	622

XX	Inhalt
Literatur	623
Sachverzeichnis	649

Identifikation dynamischer Systeme
Methoden zur experimentellen Modellbildung aus
Messdaten

Bohn, C.; Unbehauen, H.

2016, XX, 698 S. 149 Abb., Softcover

ISBN: 978-3-8348-1755-6